

## 南方鲇幼鱼运动代谢的个体变异和重复性及其饥饿响应

曾令清<sup>1,2</sup>, 彭韩柳依<sup>1</sup>, 王健伟<sup>1</sup>, 庞旭<sup>1</sup>, 曹振东<sup>1,2</sup>, 付世建<sup>1,2\*</sup>

(1. 重庆师范大学生命科学学院, 重庆 401331;

2. 重庆师范大学动物生物学重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:** 为考察温水性鱼类运动代谢的种内个体变异和重复性及其对饥饿的反应, 本研究以南方鲇幼鱼为实验对象, 在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  条件下, 在饥饿前(测定 I)后(测定 II)分别测定饥饿组  $[(12.15 \pm 0.14)\text{g}, n=29]$  和对照组  $[(12.00 \pm 0.23)\text{g}, n=28]$ , 每隔一天投喂一次 4%~5% 体质量黄鳝肉块的静止代谢率 ( $MO_{2\text{rest}}$ )、临界游泳速度和活跃代谢率 ( $MO_{2\text{active}}$ ), 并计算有氧代谢空间 ( $\text{AMS} = MO_{2\text{active}} - MO_{2\text{rest}}$ )、单位距离耗能 (COT) 和最适游泳速度 ( $U_{\text{opt}}$ )。结果显示: (1) 饥饿之后, 饥饿组的  $MO_{2\text{rest}}$ ,  $MO_{2\text{active}}$  和 AMS 分别下降了 8.6%, 36.3% 和 44.1%, 而对照组的  $MO_{2\text{rest}}$  较其两周前的上升 25.9%, 其  $MO_{2\text{active}}$  的无显著变化导致 AMS 下降了 12.6%, 但该降幅明显小于饥饿组。(2) 饥饿组  $MO_{2\text{rest}}$  的变异系数 (CV) 变小, 其  $MO_{2\text{active}}$  和 AMS 的 CV 却变大, 而对照组相应指标的 CV 呈反向的变化趋势。饥饿组  $MO_{2\text{rest}}$ ,  $MO_{2\text{active}}$  和 AMS 的重复比例均相应低于对照组。(3) 饥饿组在两次测定中运动耗氧率与游泳速度的线性方程的斜率保持不变, 但其截距明显下降, 对照组的斜率和截距均无明显变化; 饥饿导致南方鲇运动耗氧率的重复性下降。(4) 饥饿组的最小 COT ( $\text{COT}_{\text{min}}$ ) 和  $U_{\text{opt}}$  分别下降 25% 和 11.3%, 对照组的  $\text{COT}_{\text{min}}$  和  $U_{\text{opt}}$  也分别降低 8% 和 4.8%, 但均明显小于饥饿组。研究表明: 在环境食物资源匮乏情况下, 南方鲇表现出较高的运动代谢重复性, 其降低最适游泳速度并提高游泳效率的策略是对饥饿环境的一种生态适应, 可能有助于提高该种鱼的存活率。

**关键词:** 南方鲇; 运动代谢; 饥饿; 个体变异; 重复性; 游泳运动

**中图分类号:** S 965

**文献标志码:** A

动物能量学的研究指标已成体系, 有关运动代谢的研究通常关注静止代谢率 (resting metabolic rate,  $MO_{2\text{rest}}$ ) 和活跃代谢率 (active metabolic rate,  $MO_{2\text{active}}$ ), 这两个参数不仅影响动物的能量分配<sup>[1]</sup>, 而且与个体的耗能行为和生长性能等方面密切相关<sup>[2]</sup>。 $MO_{2\text{rest}}$  是指健康动物个体在某一温度、消化后且静止状态下的最小机体能量代谢需求, 当动物的代谢水平低于该值时其生理功能就会受损<sup>[3-4]</sup>;  $MO_{2\text{active}}$  是指动物在特定温度下的最大有氧代谢率, 该值与  $MO_{2\text{rest}}$  的差值即为动物的有氧代谢空间 (aerobic metabolic

scope,  $\text{AMS} = MO_{2\text{active}} - MO_{2\text{rest}}$ ), 它表示动物可为机体其他生理功能 (如消化、排泄、繁殖) 提供的最大代谢潜能<sup>[3]</sup>。现有研究常通过测定动物的耗氧率 ( $MO_2$ ) 来评价其机体某一状态下的能量代谢水平<sup>[1]</sup>。

种内个体变异包括形态、生理和行为表型 3 个方面, 表型特征在一定时期内存在稳定性且具有理论上的遗传性, 不仅是自然选择的作用对象, 而且会影响种内不同个体在面临相对环境胁迫的反应程度和所采取的适应对策, 进而还影响种内不同个体的适合度<sup>[2,5]</sup>。因此, 该方面的研究具

收稿日期: 2014-08-05 修回日期: 2014-11-17

资助项目: 国家自然科学基金 (31300341, 31172096); 重庆市自然科学基金 (cstc2014jcyjA00018); 重庆市教委科技项目 (KJ130619); 重庆师范大学重点项目 (12XLZ08); 重庆师范大学博士启动基金 (12XLB004)

通信作者: 付世建, E-mail: shijianfu9@126.com

有重要的理论研究价值和生态学意义。鱼类  $MO_{2rest}$  的个体变异及其重复性的相关研究已见报道<sup>[1,4,6-11]</sup>,然而鱼类  $MO_{2active}$  的相关研究鲜有报道<sup>[1,12]</sup>。上述研究的实验对象多为冷水性鱼类,而温水性鱼类的研究报道极为匮乏。在自然界中,鱼类经常遭遇环境食物丰度的变动并通过其形态、生理和行为的调整以适应食物资源的短缺<sup>[13-14]</sup>。饥饿作为一种常见的环境胁迫因子,不仅改变鱼类的外部形态、损害机体的生理功能,而且降低与能量代谢相关的游泳运动能力<sup>[14-16]</sup>。鱼类的游泳运动是一种高耗能的生理活动,与其适合度密切相关<sup>[17-18]</sup>。基于上述背景,我们猜测当环境食物资源匮乏时鱼类只能动用体内的储能物质,一方面,期望降低  $MO_{2rest}$  以提高生存概率,另一方面,又需在一定程度上维持游泳功能以再次获取食物或逃避敌害,这种相悖的生理功能维持需求可能影响鱼类的游泳代谢策略。因此,鱼类的生理表型(如能量代谢和游泳能力)及其重复性在饥饿之后可能发生较为明显的变化。

南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)是一种栖息于我国长江、珠江等流域的大型凶猛肉食性鱼类,也是一种常见的经济养殖品种。该鱼具有生长快、抗病强和适应广等特点,现已成为相关理论的重要研究对象<sup>[15-16,19-22]</sup>。本研究以南方鲇幼鱼为实验对象,在(25±0.5)℃条件下考察该种鱼  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  和 AMS 的个体变异,计算其单位距离耗能(cost of transport, COT)和最适游泳速度(optimal swimming speed,  $U_{opt}$ ),同时考察饥饿对该种鱼的上述能量代谢参数个体变异、COT 和  $U_{opt}$  及其重复性的影响,以阐述生理表型特征的个体变异及其重复性与环境因子的关系,为鱼类表型特征个体变异的理论研究积累基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验鱼及其驯化

本实验于2012年8月至9月完成。南方鲇来自于西南大学水产科学研究所,分养于本实验室的3个循环控温水槽(1.2 m×0.6 m×0.6 m,水容量约为250 L)中,驯化时间为1个月。用气泵向水槽持续泵入空气,控制溶氧水平>7 mg/L。水温控制在(25±0.5)℃,光周期为12 L:12 D。水槽用水为曝气5 d、除氯的自来水,其日换水量为水槽水体的15%。驯化期间,以切碎、洗净的黄鳝

(*Monopterus albus* Zuiew)肉块为饵料,每隔两天饱足投喂一次,投饵2 h后清除残饵和粪便。

### 1.2 实验设计

驯化结束,随意在3个水槽中挑选体质量相近、鱼体健康的南方鲇幼鱼60尾,装入实验室自行设计组合式的多单元格养殖循环控温系统中,每套系统包括30个独立养殖单元格(17 cm×12 cm×10 cm)。实验处理分对照组[(12.00±0.23)g, (11.5±0.1)cm]和饥饿组[(12.15±0.14)g, (11.6±0.1)cm],每组30尾,饥饿时间为2周。对照组实验鱼每隔两天投喂一次黄鳝肉块,投喂量约为鱼体质量的4%~5%,可使对照组实验鱼的体质量在2周内保持稳定。该摄食水平范围由预备实验获得:分别设定2%、4%、6%、8%的摄食水平,每组实验鱼的样本量  $n=6$ ,每隔两天投喂一次饵料,累计10 d;预备实验前后均称量鱼体质量并获其变化值,最后对体质量变化量和摄食水平作方程回归即可确定适合摄食水平。饥饿组实验鱼在2周期间无任何食物供给。对于对照组,在最后一次摄食之后,经历48 h后的消化道内食物消化吸收完毕<sup>[21-22]</sup>,因此不影响实验鱼运动耗氧率和游泳能力的测定。本研究在饥饿前(测定I)后(测定II)分别对饥饿组和对照组单尾鱼测定体长和体质量,并用流水式代谢仪测定实验鱼的  $MO_{2rest}$ ,再用游泳代谢仪测定单尾鱼在不同游泳速度下的耗氧率同时获得  $MO_{2active}$ 。实验期间,多单元格养殖系统、流水式代谢仪和游泳代谢仪的环境条件(水温、溶氧水平和光周期)均与驯化期间相同。饥饿组和对照组在实验期间分别有1尾和2尾实验鱼因故死亡,两组的样本量最终分别为29和28尾。

### 1.3 测定步骤与参数计算

静止代谢率( $MO_{2rest}$ )将实验鱼装入流水式代谢仪适应24 h,代谢仪的结构和使用方法见文献[23]。在  $U_{crit}$  测定之前3 h,每小时测定一次实验鱼的耗氧率,将这3次耗氧率的平均值作为该尾鱼在游泳速度为零的代谢率。 $MO_{2rest}$  计算公式如下:

$$MO_{2rest} = \Delta O_2 \times v/m \quad (1)$$

式中, $MO_{2rest}$  为单尾鱼的静止状态下的代谢率[mg/(kg·h)], $\Delta O_2$  为实验呼吸管(有鱼)和空白管(无鱼)的溶氧水平差值(mg/L), $v$  为实验管的流水速度(L/h), $m$  为单尾鱼的体质量(kg)。

单尾鱼静止代谢变化的判定标准:在测定 I 和 II 中,两处理组(对照组和饥饿组)的单尾鱼的静止代谢率均测定 3 次,并通过  $T$ -检验比较,若显著差异则认为升高或下降,若差异不明显则认为无变化。

临界游泳速度 ( $U_{crit}$ ) 在  $MO_{2rest}$  测定之后,将鱼装入游泳代谢仪的游泳管中驯化 1 h,管内的流速为 6 cm/s (约 0.5 倍体长/秒, body length per second, BL/s)。  $U_{crit}$  测定采用逐步提高法,起始速度为 6 cm/s,每档的流速增量 ( $\Delta V$ ) 为 6 cm/s,每档的游泳历时 ( $\Delta T$ ) 为 20 min,直至实验鱼力竭。力竭标准:实验鱼因不能抵抗水流而后退至游泳代谢仪尾端筛板且在尾端筛板处的停留时间在 20 s 以上<sup>[24]</sup>。力竭之后,取出实验鱼并测量其体高、体宽、体质量、体长等相关形态学参数。由于所有实验鱼横截面积未超过水体横截面积的 10%,无需游泳速度校正。

绝对临界游泳速度 (absolute critical swimming speed,  $U_a$ ) 的计算公式<sup>[25]</sup>如下:

$$U_a = V + (t/\Delta T)\Delta V \quad (2)$$

式中,  $V$  是单尾鱼能完成 20 min 游泳历时的最高流速 (cm/s),  $\Delta V$  是流速增量 (6 cm/s),  $\Delta T$  是每档流速的时间历时 (20 min),  $t$  是实验鱼在流速为  $V + \Delta V$  条件下的游泳历时 (< 20 min)。

相对临界游泳速度 (relative critical swimming speed,  $U_r$ ):

$$U_r = U_a/L \quad (3)$$

式中,  $U_a$  为绝对临界游泳速度 (cm/s),  $L$  为实验鱼的体长 (cm)。

运动代谢率 ( $MO_2$ ) 在  $U_{crit}$  测定过程中同时测量、计算实验鱼的运动代谢率。鱼类游泳代谢仪系统附有一个外部水循环系统 (流量约为 500 mL/min), 当该系统与代谢仪连接形成封闭状态时可测定代谢仪内水体溶氧水平, 开放时可进行代谢仪水体与环境水体的置换。在流速调到设定值后, 每隔 2 min 测定一次代谢仪内的溶氧水平 (mg/L), 共测定 10 次。运动状态下实验鱼的单位体质量游泳代谢率 [ $MO_2$ , mg/(kg · h)] 的计算公式:

$$MO_2 = (S_i \times 60 - S_b) \times V/m \quad (4)$$

式中,  $S_i$  [mg/(L · min)] 为每档期间 (20 min) 代谢仪内水体的溶氧水平随时间变化的斜率, 当相关指数  $R^2 > 0.95$  时的斜率即可参与  $MO_2$  的计

算。60 为 60 min,  $S_b$  为在 1 h 期间游泳代谢仪内部细菌耗氧的斜率。  $V$  为减去实验鱼体积后的代谢仪内的水体体积 (3.50 L),  $m$  为实验鱼的体质量 (kg)。

单位距离耗能 (COT):

$$COT = MO_2 \times 13.56 / (U \times 36) \quad (5)$$

式中, COT [J/(kg · m)] 为实验鱼的单位距离耗能, 表示单位体质量鱼类运动一定距离的能量消耗,  $MO_2$  为在设定水流速度下实验鱼的代谢率 [mg  $O_2$ /(kg · h)],  $U$  为设定的水流速度 (cm/s), 36 是将游泳速度量纲 cm/s 转换成 m/s 的换算系数, 13.56 为氧热当量系数 (J/mg  $O_2$ )<sup>[26]</sup>。当 COT 最小时 (COT<sub>min</sub>), 相应游泳速度即为最适游泳速度 ( $U_{opt}$ )。

#### 1.4 数据处理与统计分析

用 Excel (2003) 对实验数据作常规计算, 并用 Statistics (6.0) 和 SigmaStat (3.5) 软件进行统计分析, 数据以平均值 ± 标准误 (mean ± SE) 表示。同一时间, 对照组与饥饿组之间的数据用独立样本  $T$ -检验, 饥饿前后同一处理组的数据用配对  $T$ -检验, 重复性用 Spearman 等级相关分析, 直线方程的斜率和截距的显著性差异用协方差 (analysis of covariance, ANCOVA) 分析, 同一处理组的能量代谢参数的重复比例 (测定 II/测定 I) 用重复方差 (repeated ANOVA) 分析, 显著水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 饥饿对南方鲈 $U_{crit}$ 、体质量、 $MO_{2rest}$ 、 $MO_{2active}$ 和 AMS 的影响

饥饿组的  $U_a$  从测定 I 的 38.1 cm/s 明显下降到测定 II 的 27.9 cm/s, 其  $U_r$  由 3.3 BL/s 降低至 2.5 BL/s ( $P < 0.001$ )。而对照组的  $U_a$  变化较小, 从测定 I 的 38.5 cm/s 降至测定 II 的 35.3 cm/s,  $U_r$  由 3.4 BL/s 降低至 3.1 BL/s ( $P < 0.05$ )。

饥饿组实验鱼体质量由饥饿前的 (12.15 ± 0.14) g 降至饥饿后的 (10.31 ± 0.14) g, 下降 15.1% ( $P < 0.001$ ), 而对照组的体质量无明显变化 ( $P > 0.05$ )。在测定 I 中, 饥饿组的  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  和 AMS 均与对照组的无明显差异 (表 1)。在测定 II 中, 饥饿组的  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  和 AMS 较测定 I 分别下降了 8.6%, 36.3% 和

44.1%,并且均明显小于同期的对照组(表1)。对照组部分个体  $MO_{2rest}$  的显著增加导致对照组  $MO_{2rest}$  的上升25.9% ( $P < 0.001$ ),由于对照组的  $MO_{2active}$  无显著变化( $P = 0.112$ )而导致该组实验

鱼的 AMS 下降了 12.6% ( $P = 0.002$ ),但该降幅明显小于饥饿组 ( $P < 0.001$ )。对照组  $MO_{2rest}$  的 CV 增加,其  $MO_{2active}$  和 AMS 的 CV 却缩小。然而,饥饿组相应指标的 CV 呈反向变化。

表 1 南方鲇幼鱼的静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间  
Tab. 1 Descriptions of  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish mg/(kg · h)

		对照组 control group			饥饿组 fasting group		
		静止代谢率 $MO_{2rest}$	活跃代谢率 $MO_{2active}$	有氧代谢空间 AMS	静止代谢率 $MO_{2rest}$	活跃代谢率 $MO_{2active}$	有氧代谢空间 AMS
	平均值 ± 标准误差 mean ± se	125.6 ± 3.3 <sup>b</sup>	437.3 ± 16.1 <sup>a</sup>	312.0 ± 16.1 <sup>a</sup>	115.1 ± 4.4 <sup>a</sup>	462.2 ± 19.0 <sup>a</sup>	347.1 ± 19.4 <sup>a</sup>
测定 I trial I	标准差 sd	18.2	88.3	88.2	23.8	102.5	106.2
	变异系数/% CV	14.8	20.2	28.3	20.7	22.5	30.6
	最大值 maximum	162.4	688.0	525.7	163.8	703.8	579.2
	最小值 minimum	93.5	256.3	153.0	71.3	210.2	67.5
	平均值 ± 标准误差 mean ± se	155.5 ± 5.6 <sup>aA</sup>	411.8 ± 12.3 <sup>aA</sup>	256.3 ± 12.7 <sup>bA</sup>	100.7 ± 3.2 <sup>bB</sup>	289.4 ± 14.5 <sup>bB</sup>	188.7 ± 14.8 <sup>bB</sup>
测定 II trial II	标准差 sd	30.7	67.3	69.5	17.8	78.1	80.9
	变异系数/% CV	19.8	16.3	27.1	17.7	35.0	55.1
	最大值 maximum	226.8	544.4	395.2	142.4	420	313.2
	最小值 minimum	87.7	286.3	97.0	64.6	124.5	10.7

注:a,b表示同一处理组在两次测定中的数据存在明显差异( $P < 0.05$ ),A,B表示饥饿组与对照组在测定 II 中的数据存在显著差异( $P < 0.05$ )

Notes:the letters a,b denote a significant difference in each of three indexes between two trials within the same group whereas A,B denote a significant difference in specific metabolic parameter between the control and fasting group in trial II ( $P < 0.05$ )

等级相关分析显示饥饿组和对照组体质量的重复性较好(图 1-a,图 1-e 和表 2,二者  $P < 0.05$ ),而饥饿组和对照组  $MO_{2rest}$  的重复性较差(图 1-b,图 1-f 和表 2,二者  $P > 0.05$ )。此外,饥饿组的  $MO_{2active}$  和 AMS 的重复性也较差(图 1-g 和图 1-h,二者  $P > 0.05$ )。然而,在两周内对照组的  $MO_{2active}$  和 AMS 的重复性较好(图 1-c 和图 1-d,二者  $P < 0.05$ )。

## 2.2 南方鲇能量代谢参数的重复比例与重复性

饥饿组  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  和 AMS 的重复比例明显低于对照组(表 3,所有  $P < 0.001$ )。在同一

组内, $MO_{2rest}$  的重复比例均明显高于  $MO_{2active}$  和 AMS(饥饿组: $F$ 值 = 21.174,  $P < 0.001$ ;对照组: $F$ 值 = 16.097,  $P < 0.001$ )。

不论饥饿组还是对照组,在测定 I 和测定 II 中  $MO_{2rest}$  与  $MO_{2active}$ 、AMS 均不相关(图 2-a 和图 2-b,图 2-d 和图 2-e 和表 4,所有  $P > 0.05$ )。然而,两个实验组  $MO_{2active}$  与 AMS 之间均呈正相关(图 2-c,图 2-f 和表 4,所有  $P < 0.001$ ),即具有较大  $MO_{2active}$  的个体具有较大的 AMS,且该关联不受饥饿影响,反之亦然。

表 2 南方鲇幼鱼静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间残差重复性的统计结果

Tab. 2 Statistic descriptions of repeatability of residual  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish

参数 parameters	对照组 control group		饥饿组 fasting group	
	$r$	$P$	$r$	$P$
体质量 body mass	0.493	0.008	0.682	<0.001
静止代谢率 $MO_{2rest}$	0.250	0.199	0.037	0.848
活跃代谢率 $MO_{2active}$	0.472	0.011	0.339	0.072
有氧代谢空间 AMS	0.440	0.019	0.324	0.086

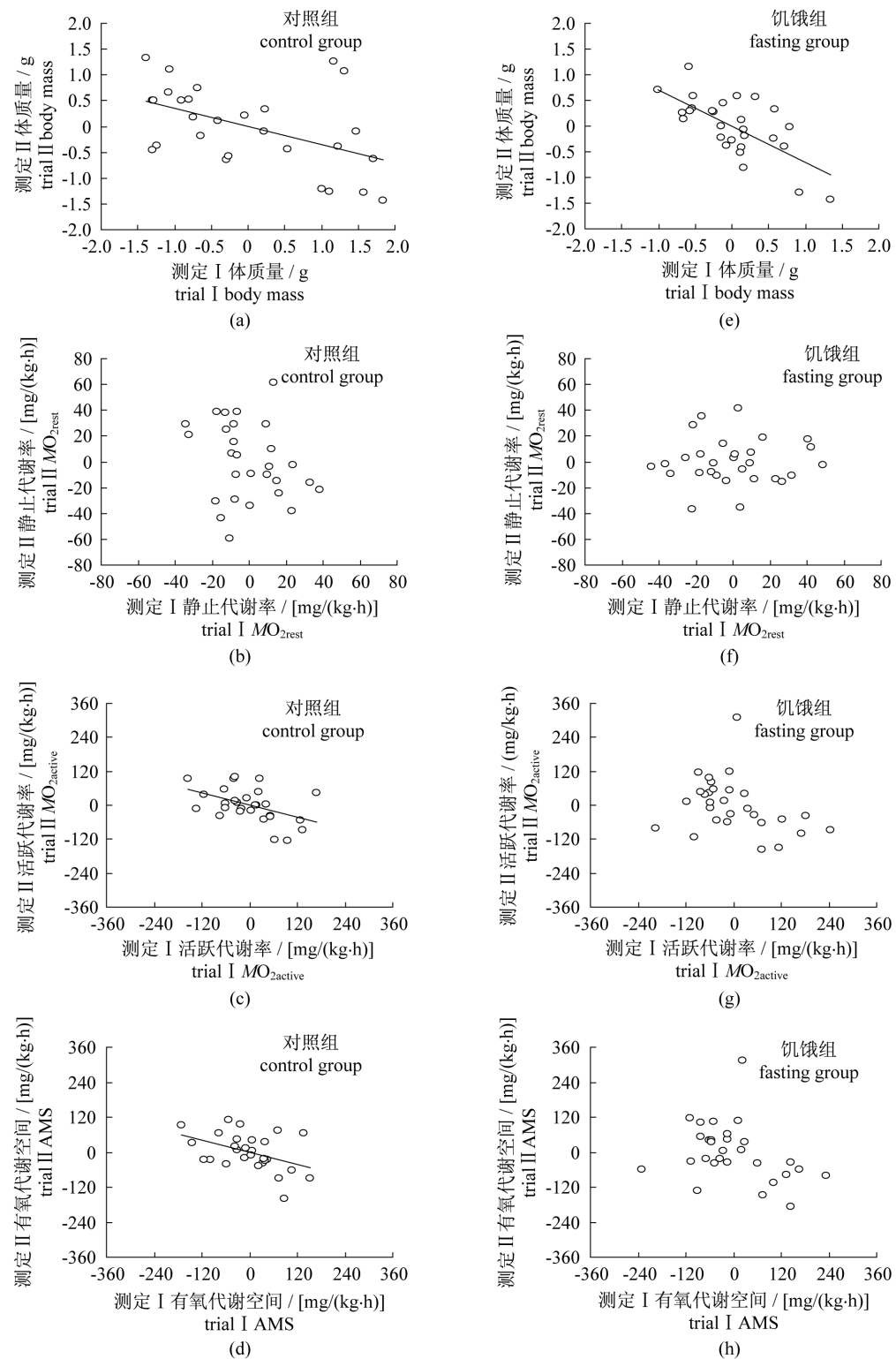


图 1 南方鲂幼鱼体质量、静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间残差的重复性

Fig. 1 Repeatability of residual body mass,  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish

表 3 南方鲇幼鱼静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间的重复性  
 Tab. 3 Repeatability of  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish

	对照组 control group			饥饿组 fasting group		
	静止代谢率 $MO_{2rest}$	活跃代谢率 $MO_{2active}$	有氧代谢空间 AMS	静止代谢率 $MO_{2rest}$	活跃代谢率 $MO_{2active}$	有氧代谢空间 AMS
平均值 $\pm$ 标准误差 mean $\pm$ se	1.259 $\pm$ 0.051 <sup>ax</sup>	0.967 $\pm$ 0.036 <sup>ay</sup>	0.874 $\pm$ 0.056 <sup>ay</sup>	0.914 $\pm$ 0.047 <sup>bx</sup>	0.623 $\pm$ 0.032 <sup>by</sup>	0.542 $\pm$ 0.045 <sup>by</sup>
标准差 sd	0.279	0.195	0.306	0.259	0.176	0.245
变异系数/% CV	22.197	20.180	35.024	28.283	28.297	45.159
最大值 maximum	1.834	1.474	1.827	1.417	0.947	1.045
最小值 minimum	0.837	0.639	0.312	0.541	0.290	0.054

注:a,b表示饥饿组与对照组之间的数据存在明显差异( $P < 0.05$ ),x,y表示同一处理组不同指标间的数据存在显著差异( $P < 0.05$ )

Notes: The letters a, b denote a significant difference between the control group and fasting group, whereas x, y denote a significant difference in metabolic parameter in a specific group ( $P < 0.05$ )

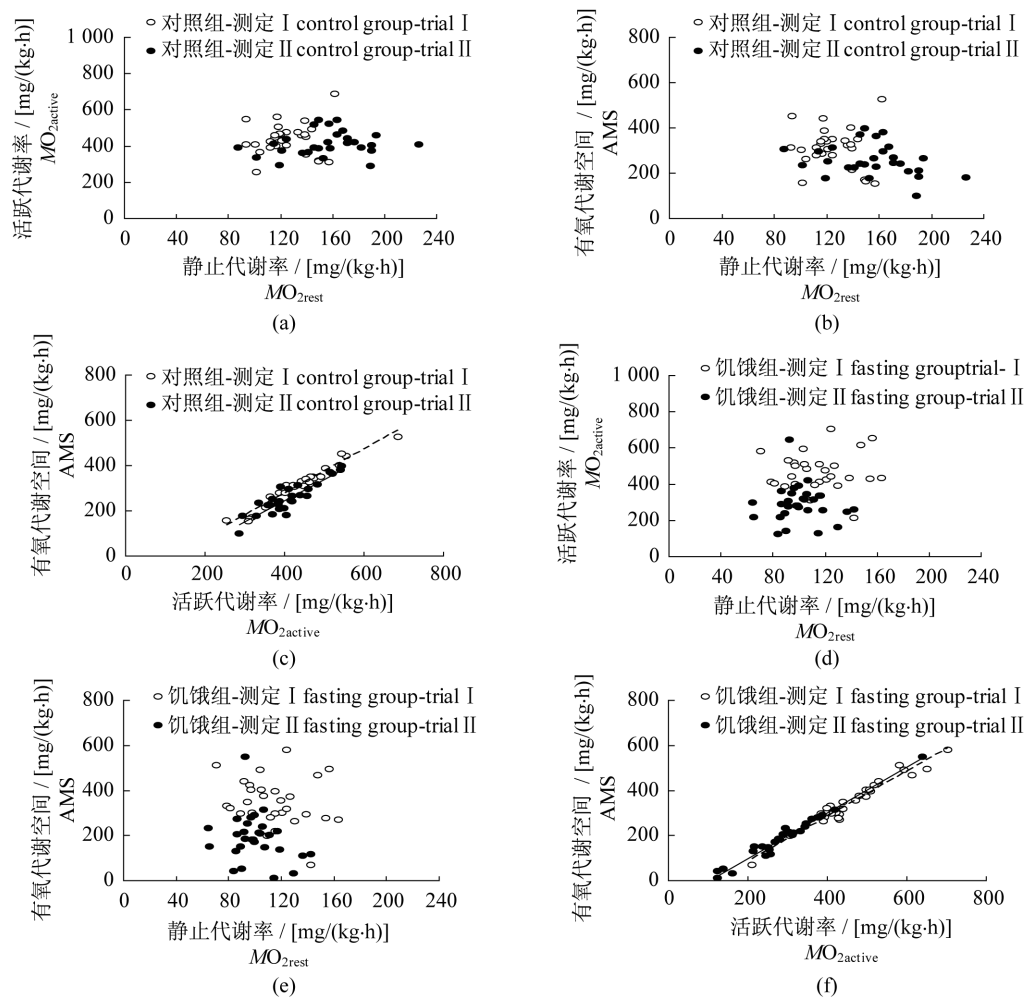


图 2 南方鲇幼鱼静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间三者之间关系的重复性

Fig. 2 Repeatability of the correlations among  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish

表 4 南方鲇幼鱼静止代谢率、活跃代谢率和有氧代谢空间关联重复性的统计结果

Tab.4 Statistic descriptions of repeatability of correlations among  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in juvenile southern catfish.

组别 group	关联参数 parameters	测定 I trial I		测定 II trial II	
		<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
饥饿组 fasting group	静止代谢率 vs 活跃代谢率 $MO_{2rest}$ vs $MO_{2active}$	0.113	0.568	0.157	0.423
	静止代谢率 vs 有氧代谢空间 $MO_{2rest}$ vs AMS	0.097	0.623	0.290	0.134
	活跃代谢率 vs 有氧代谢空间 $MO_{2active}$ vs AMS	0.978	<0.001	0.900	<0.001
对照组 control group	静止代谢率 vs 活跃代谢率 $MO_{2rest}$ vs $MO_{2active}$	0.021	0.913	0.074	0.703
	静止代谢率 vs 有氧代谢空间 $MO_{2rest}$ vs AMS	0.204	0.289	0.243	0.204
	活跃代谢率 vs 有氧代谢空间 $MO_{2active}$ vs AMS	0.974	<0.001	0.985	<0.001

### 2.3 饥饿对南方鲇运动耗氧率重复性的影响

饥饿组在测定 I 和测定 II 中的运动代谢率均随游泳速度增加呈上升的变化趋势(图 3-a),但运动代谢率与游泳速度的线性关系变化明显(表 5),截距下降(表 6,  $P < 0.05$ )。对照组在测定 I 和测定 II 的运动代谢率也均随游泳速度上升也呈

提高的变化趋势(图 3-b),但在两次测定中运动代谢率与游泳速度的线性关系保持稳定(表 5),即斜率和截距无明显变化(表 6,  $P > 0.05$ )。另外,饥饿组和对照组的运动代谢率的重复性均较好(图 3-c 和表 5),但是前者运动代谢率的线性斜率和截距均明显小于后者(表 5,表 6)。

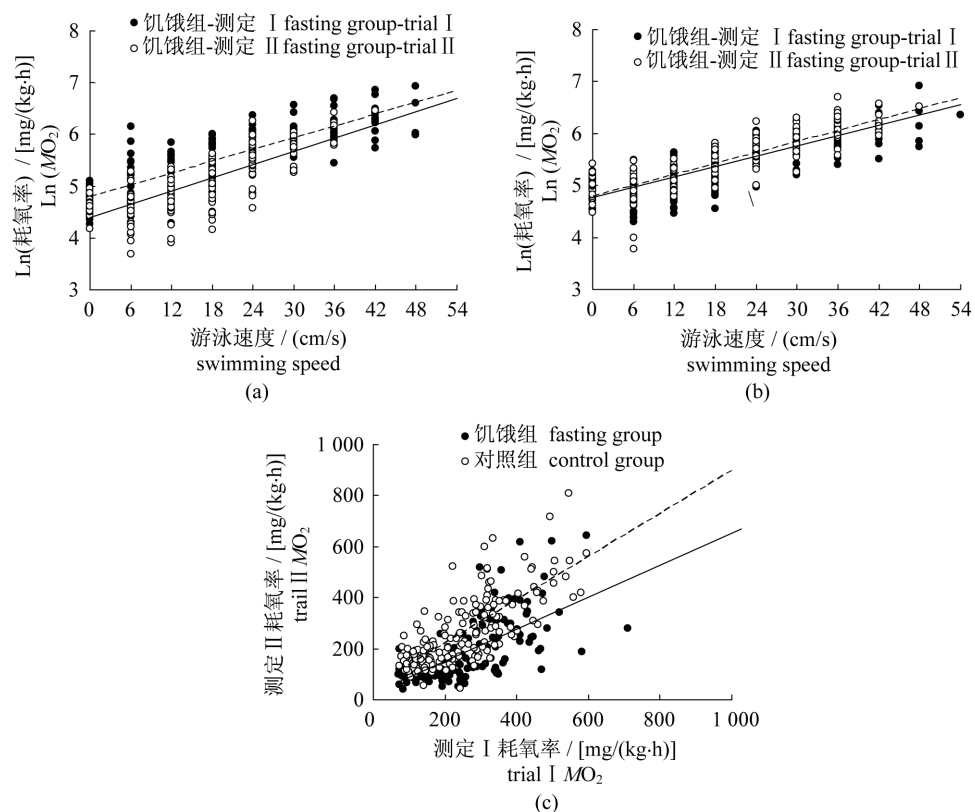


图 3 南方鲇幼鱼运动代谢率与游泳速度的关系及运动代谢率的重复性

Fig.3 Relationship between active metabolic rate and swimming speed, and its repeatability of active metabolic rate in juvenile southern catfish

表 5 南方鲇幼鱼能量代谢参数的线性回归方程 ( $Y = aX + b$ ) 参数  
 Tab.5 Parameters of linear regression ( $Y = aX + b$ ) in indices of locomotor metabolism in juvenile southern catfish

组别 groups	数据来源 original data	样本量 <i>n</i>	斜率 slope <i>a</i>	截距 intercept <i>b</i>	$R^2$	<i>P</i>
对照组 control group	测定 I 耗氧率 vs 速度 trial I $MO_2$ vs speed	28	0.033 ± 0.001	4.761 ± 0.035	0.731	< 0.01
	测定 II 耗氧率 vs 速度 trial II $MO_2$ vs speed	28	0.035 ± 0.002	4.790 ± 0.034	0.731	< 0.01
	测定 I 耗氧率 vs 测定 II 耗氧率 trial I $MO_2$ vs trial II $MO_2$	28	0.849 ± 0.052	49.954 ± 14.121	0.589	< 0.001
	测定 I 单位距离耗能 vs 测定 II 单位距离耗能 trial I COT vs trial II COT	28	0.331 ± 0.057	3.393 ± 0.356	0.194	< 0.001
饥饿组 fasting Group	测定 I 耗氧率 vs 速度 trial I $MO_2$ vs speed	29	0.038 ± 0.001	4.800 ± 0.039	0.725	< 0.001
	测定 II 耗氧率 vs 速度 trial II $MO_2$ vs speed	29	0.043 ± 0.003	4.389 ± 0.050	0.611	< 0.001
	测定 I 耗氧率 vs 测定 II 耗氧率 trial I $MO_2$ vs trial II $MO_2$	29	0.628 ± 0.055	23.957 ± 15.360	0.464	< 0.001
	测定 I 单位距离耗能 vs 测定 II 单位距离耗能 trial I COT vs trial II COT	29	0.185 ± 0.066	3.158 ± 0.430	0.066	< 0.01

注:方程中 Y 是指求对数的运动耗氧率, X 是指游泳速度, a 和 b 是常数

Notes: The capital letter Y in equation denotes locomotion metabolism that were performed with logarithm and X denotes the swimming speed, while lower letter a and b are constants

表 6 南方鲇幼鱼回归方程斜率和截距的比较

Tab.6 Comparisons of the slope and intercept in curve regressions in juvenile southern catfish

组别 groups	比较内容 comparative data	斜率和截距 slope <i>a</i> and intercept <i>b</i>	自由度 df	<i>F</i> 值	$R^2$	<i>P</i>
对照组 control group	测定 I vs 测定 II (图 3-a) trial I vs trial II (Fig. 3-a)	斜率 slope <i>a</i>	1 405	0.300	0.545	0.584
		截距 intercept <i>b</i>	1 406	3.602	0.544	0.058
饥饿组 fasting group	测定 I vs 测定 II (图 3-b) trial I vs trial II (Fig. 3-b)	斜率 slope <i>a</i>	1 367	2.514	0.635	0.114
		截距 intercept <i>b</i>	1 368	43.127	0.635	< 0.001
对照组 vs 饥饿组 control group vs fasting group	测定 I 耗氧率 vs 测定 II 耗氧率 (图 3-c) trial I $MO_2$ vs trial II $MO_2$ (Fig. 3-c)	斜率 slope <i>a</i>	1 340	0.398	0.532	0.528
		截距 intercept <i>b</i>	1 341	7.163	0.532	0.008
对照组 vs 饥饿组 control group vs fasting group	测定 I 单位距离耗能 vs 测定 II 单位距离耗能 (图 4-c) trial I COT vs trial II COT (Fig. 4-c)	斜率 slope <i>a</i>	1 250	2.864	0.195	0.092
		截距 intercept <i>b</i>	1 251	33.941	0.186	< 0.001

#### 2.4 饥饿对南方鲇 COT 的影响

饥饿组和对照组的 COT 随游泳速度的增加呈先下降后上升的变化规律 (图 4-a, b)。其中, 饥饿组在测定 II 中的 COT 在相同游泳速度下整体上小于其测定 I 结果, 而对照组两次 COT 曲线十分接近。饥饿组在测定 I 和测定 II 中的最小 COT<sub>min</sub> 分别为 4.71 和 3.52 J/(kg · m), 变化 25%, 其  $U_{opt}$  分别为 26.39 和 23.42 cm/s, 变化

11.30%, 分别为  $U_{crit}$  的 69.2% 和 83.8%。然而, 对照组在测定 I 和测定 II 中的 COT<sub>min</sub> 分别为 4.0 和 4.32 J/(kg · m), 变化 8%; 其  $U_{opt}$  分别为 29.94 和 28.49 cm/s, 变化 4.83%, 分别为  $U_{crit}$  的 77.8% 和 80.8%。两实验组 COT 的重复性较好 (图 4-c, 表 5), 协方差结果显示二者的斜率无明显差异, 而截距存在差异 (表 6)。



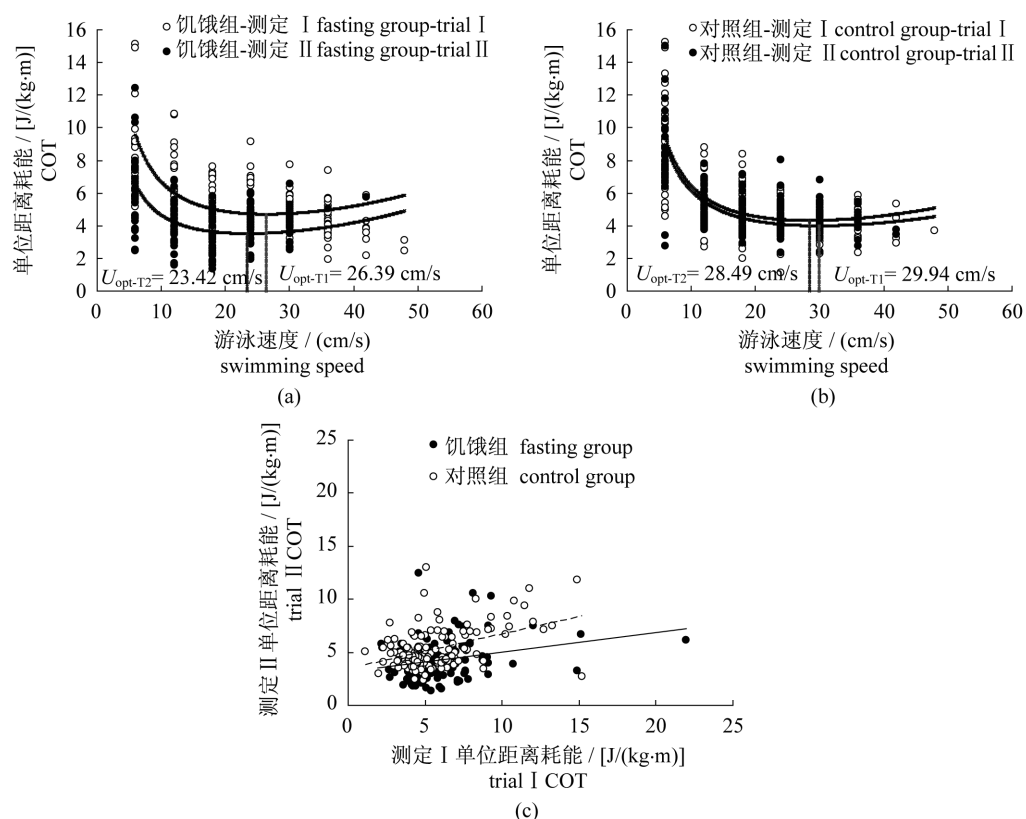


图4 南方鲈幼鱼的单位距离耗能(COT)及其重复性

Fig. 4 The cost of transport(COT) and its repeatability in juvenile southern catfish

### 3 讨论

#### 3.1 饥饿对南方鲈运动代谢个体变异的影响

饥饿作为自然界常见的环境胁迫因子,不仅导致鱼类体质量和肥满度的下降,而且引起生理功能的下调和能量代谢水平的降低<sup>[4,13]</sup>。研究发现,在水温 25 °C 条件下且饥饿 14 d 的南方鲈幼鱼的  $MO_{2rest}$  分别下降 43%<sup>[15]</sup> 和 40%<sup>[16]</sup>,而本研究同样经历饥饿两周的同种幼鱼仅下降 13%,明显低于先前的研究报道。这种差异的可能在于先前研究的实验鱼在饥饿期间全部生存于代谢仪的呼吸管内,狭小的呼吸管结构限制南方鲈的活动空间可能导致其耗能维持的活性组织(如肌肉和消化道)生理功能出现下调且更为明显;而本研究中南方鲈生存于较大空间的单元格中,可进行适度的游泳运动,因而其活性组织特别是肌肉组织功能得到维持并保持一定的活跃性。虽然本研究南方鲈幼鱼  $MO_{2rest}$  的下降比例较小,但本研究实验鱼体质量的下降幅度(15.1%)要大于上述研究报道(11.5%<sup>[15]</sup> 和 10.4%<sup>[16]</sup>),表明  $MO_{2rest}$  的下调幅度与该种鱼体质量的变化程度可能有

关。两周饥饿导致南方鲈幼鱼的  $MO_{2active}$  和 AMS 分别下降 26.9% 和 25.4%<sup>[15]</sup>,而本研究的  $MO_{2active}$  和 AMS 分别下降 36.3% 和 44.8%,同时  $MO_{2active}$  和 AMS 的减少必然伴随有氧运动能力  $U_a$  的降低[19.2%<sup>[15]</sup> 和 24% (本研究)],暗示环境食物丰度的降低明显缩小鱼类有氧代谢潜能,这可能限制其与捕食、避敌有关的活动能力。另外,大西洋鲑(*Salmo salar* Linnaeus)存在明显的  $MO_{2rest}$  个体差异,较高  $MO_{2rest}$  个体具有较小的 AMS,反之亦然<sup>[8]</sup>。然而,在本研究中饥饿组和对照组南方鲈  $MO_{2rest}$  与  $MO_{2active}$  和 AMS 均无任何的相关性,即该种鱼不存上述的关联现象,但是南方鲈的  $MO_{2active}$  与 AMS 之间的正相关却不受饥饿的影响,即较高  $MO_{2active}$  南方鲈个体仍然拥有较大的 AMS 且该关系并不依赖于环境食物丰度的变动。

有关动物能量代谢的种间或种内变异引起研究者的关注<sup>[5]</sup>,除了比较不同环境条件下生理表型观测值的大小,还需分析生理表型观测值的重复性,常以重复比例、稳定期和相关系数  $r$  等评估。其中,相关系数  $r$  广泛采用, $r$  值越高表型的

重复性越好<sup>[1,7,11,27]</sup>。表型特征重复性分析的时间间隔既有 1 个时期<sup>[6,11-12,27]</sup>,也有 2 至 3 个时期<sup>[4,9]</sup>甚至 4 个时期<sup>[28]</sup>。不同鱼类  $MO_{2rest}$  在不同时间间隔内的  $r$  值也不尽相同。研究发现,间隔 5 周鲟 (*Salmo trutta* Linnaeus) 的  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  和 AMS 的相关系数  $r$  分别介于 0.52 ~ 0.58, 0.32 ~ 0.38 和 0.39 ~ 0.43, 10 周间隔导致 3 个参数的  $r$  分别介于 0.16 ~ 0.42, 0.25 ~ 0.35 和 0.35 ~ 0.36, 然而 15 周的间隔 3 个参数的相关性全部消失, 即不相关<sup>[1]</sup>。间隔 8 和 16 周大西洋鲑  $r$  值分别为 0.4<sup>[4]</sup> 和 0.68<sup>[6]</sup>, 而间隔 5 个月的花鳅 (*Cobitis taenia* Linnaeus) 的  $r$  值介于 0.68 ~ 0.73<sup>[11]</sup>。本研究饥饿组和对照组在 2 周间隔内  $MO_{2rest}$  的  $r$  值介于 0.037 ~ 0.250, 呈现无相关性且低于上述  $r$  值范围, 即重复性差。然而, 对照组  $MO_{2active}$  和 AMS 的重复性较好, 其相关系数  $r$  分别为 0.472 和 0.440, 饥饿组  $MO_{2active}$  和 AMS 的重复性却较差, 上述研究表明, 不论食物资源是否减少还是维持稳定均会降低鱼类生理表型, 如  $MO_{2rest}$  的重复性。大西洋鲑也具有类似的研究结果<sup>[4]</sup>。这种表型重复性下降的现象与实验仪器精度及稳定性、鱼类生理表型性能最大值的诱导办法以及在不同测定中生理反应的真实差异有关<sup>[29]</sup>, 还与社群个体地位排序的改变<sup>[1]</sup> 和体质量的改变有关<sup>[7,30]</sup>, 同时环境条件 (如季节更替、溶氧水平和水体温度) 也会影响表型特征的重复性<sup>[10]</sup>, 暗示鱼类表型特征的重复性存在着时限, 栖息环境时空异质性的 高低与内在的遗传特性、鱼体的发育阶段均会影响表型特征的重复性<sup>[6]</sup>。

### 3.2 饥饿对南方鲇运动 $MO_2$ 和 COT 的影响

通常而言, 鱼类的运动代谢率随游泳速度增加而升高<sup>[12,24]</sup>。环境因子影响运动代谢率与游泳速度的关系, 如饥饿<sup>[15]</sup>、温度<sup>[18,31]</sup>、摄食<sup>[31-32]</sup>、溶氧水平<sup>[32-33]</sup> 和运动锻炼与剪鳍<sup>[34]</sup>。本研究发现, 饥饿导致南方鲇幼鱼运动  $MO_2$  与游泳速度的线性方程截距下降, 说明南方鲇幼鱼在相同游泳速度下的运动  $MO_2$  较小, 但是该现象仅存在于中低流速范围内 (图 3-a)。有关该种鱼的早期研究也具有类似的实验结果<sup>[15]</sup>。该现象可能原因如下: (1) 消化道及消化腺是高能耗维持的组织器官, 可占静止代谢水平的 40%<sup>[35]</sup>, 饥饿易导致消化道功能的明显下调, 即其维持代谢降低<sup>[13]</sup>; (2) 饥饿期间鱼类能量消耗依赖于体内有限储能物

质, 在运动过程中动用肝脏等器官能量底物 (如糖原和脂肪) 的转运方式可能发生改变, 并且肌组织在短期饥饿仍保持较好的完整性<sup>[13,36]</sup>。然而, 该现象的内在机制仍有待深入研究<sup>[15]</sup>。此外, 研究发现间隔 3 月大西洋鲑 (*Gadus morhua* Linnaeus) 运动  $MO_2$  重复性仅在较高游泳速度下较好<sup>[12]</sup>。在本研究中, 饥饿组和对照组南方鲇幼鱼运动  $MO_2$  重复性均较好, 这与大西洋鲑的研究结果类似<sup>[12]</sup>, 但饥饿组的运动  $MO_2$  线性方程的截距却显著小于对照组, 表明南方鲇运动  $MO_2$  重复性不受短期饥饿的影响。

鱼类特别是洄游性种类在长期进化过程中已形成一系列在游泳状态下的能量利用策略, 包括在低水流下游泳或利用水体旋涡的逆流助推作用<sup>[37]</sup>、暴发—滑行的游泳策略<sup>[38]</sup> 和最适游泳速度策略<sup>[39]</sup>。单位距离耗能 (COT) 表示单位体质量鱼类的单位距离的能量消耗<sup>[40]</sup>, 自然选择可能倾向于在鱼类游泳过程中的能量效率最大化<sup>[24,39]</sup>。研究发现, 尾鳍缺失、过高或过低水温、低氧等环境因子均会降低鱼类的能量效率<sup>[34,37,41]</sup>。但本研究发现, 饥饿组  $COT_{min}$  和  $U_{opt}$  的下降程度均大于对照组, 表明在环境食物资源匮乏情况下南方鲇幼鱼降低 COT 和最适游泳速度, 同时, 也降低其  $MO_{2rest}$ , 该代谢对策可能有利于提高体内有限储能物质的能量利用效率并可有效适应复杂多变的栖息环境。

### 参考文献:

- [1] Norin T, Malte H. Repeatability of standard metabolic rate, active metabolic rate and aerobic scope in young brown trout during a period of moderate food availability [J]. The Journal of Experimental Biology, 2011, 214(10):1668-1675.
- [2] Biro P A, Stamps J A. Do consistent individual differences in metabolic rate promote consistent individual differences in behavior? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2010, 25(11):653-659.
- [3] Beck F, Gropp J. Estimation of the starvation losses of nitrogen and energy in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with special regard to protein and energy maintenance requirements [J]. Journal of Applied Ichthyology, 1995, 11(3-4):263-275.
- [4] O'Connor K I, Taylor A C, Metcalfe N B. The stability of standard metabolic rate during a period of food deprivation in juvenile Atlantic salmon [J].

- Journal of Fish Biology, 2000, 57(1): 41 – 51.
- [ 5 ] White C R, Schimpf N G, Cassey P. The repeatability of metabolic rate declines with time [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2013, 216 ( 10 ): 1763 – 1765.
- [ 6 ] McCarthy I D. Temporal repeatability of relative standard metabolic rate in juvenile Atlantic salmon and its relation to life history variation [ J ]. Journal of Fish Biology, 2000, 57(1): 224 – 238.
- [ 7 ] Nespolo R F, Franco M. Whole-animal metabolic rate is a repeatable trait: A meta-analysis [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2007, 210 ( 11 ): 2000 – 2005.
- [ 8 ] Cutts C J, Metcalfe N B, Taylor A C. Juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) with relatively high standard metabolic rates have small metabolic scopes [ J ]. Functional Ecology, 2002, 16(1): 73 – 78.
- [ 9 ] Cutts C J, Adams C E, Campbell A. Stability of physiological and behavioural determinants of performance in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) [ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(5): 961 – 968.
- [ 10 ] Seppänen E, Piironen J, Huuskonen H. Consistency of standard metabolic rate in relation to life history strategy of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 156(2): 278 – 284.
- [ 11 ] Maciak S, Konarzewski M. Repeatability of standard metabolic rate (SMR) in a small fish, the spined loach (*Cobitis taenia*) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 157(2): 136 – 141.
- [ 12 ] Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2000, 203(2): 347 – 357.
- [ 13 ] McCue M D. Starvation physiology: Reviewing the different strategies animals use to survive a common challenge [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 156(1): 1 – 18.
- [ 14 ] German D P, Neuberger D T, Callahan M N, *et al.* Feast to famine: The effects of food quality and quantity on the gut structure and function of a detritivorous catfish (Teleostei: Loricariidae) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 155(3): 281 – 293.
- [ 15 ] Fu S J, Pang X, Cao Z D, *et al.* The effects of fasting on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2011, 158(4): 498 – 505.
- [ 16 ] Zeng L Q, Li F J, Li X M, *et al.* The effects of starvation on digestive tract function and structure in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2012, 162(3): 200 – 211.
- [ 17 ] Plaut I. Critical swimming speed: Its ecological relevance [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2001, 131(1): 41 – 50.
- [ 18 ] Claireaux G, Couturier C, Groison A L. Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2006, 209(17): 3420 – 3428.
- [ 19 ] Shi B N. The biological study on the southern catfish in the Jialing river [ J ]. Journal of Southwest China Normal University, 1980, 2: 45 – 52. [ 施白南. 嘉陵江南方大口鲶的生物学研究. 西南师范学院学报, 1980, 2: 45 – 52. ]
- [ 20 ] Xie X J, Deng L, Zhang B. Advances and studies on ecophysiological effects of starvation on fish [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(2): 181 – 187. [ 谢小军, 邓利, 张波. 饥饿对鱼类生理生态学影响的研究进展. 水生生物学报, 1998, 22(2): 181 – 187. ]
- [ 21 ] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size on postprandial metabolic response in southern catfish (*Silurus meridionalis*) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2005, 140(4): 445 – 451.
- [ 22 ] Zeng L Q, Li F J, Fu S J, *et al.* Effect of feeding on the function and structure of the digestive system in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [ J ]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(5): 1459 – 1475.
- [ 23 ] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. The effects of chasing and air exposing on oxygen consumption in *Pelteobag vachelli* [ J ]. Chinese Journal of Zoology, 2007, 42(2): 111 – 115. [ 付世建, 曹振东, 彭姜岚. 追赶和空气暴露时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响 ]

- 响. 动物学杂志, 2007, 42(2): 111 - 115. ]
- [24] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, *et al.* The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2003, 206 ( 18 ): 3239 - 3251.
- [25] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon [ J ]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1964, 21 ( 5 ): 1183 - 1226.
- [26] Elliott J M, Davison W. Energy equivalents of oxygen consumption in animal energetics [ J ]. Oecologia, 1975, 19(3): 195 - 204.
- [27] Zeng L Q, Peng H L Y, Wang J W, *et al.* The effects of food deprivation on individual variation and repeatability in swimming performance of juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(5): 883 - 890. [曾令清, 彭韩柳依, 王健伟, 等. 饥饿对南方鲇幼鱼游泳能力个体变异和重复性的影响. 水生生物学报, 2014, 38(5): 883 - 890. ]
- [28] Hanson K C, Hasler C T, Donaldson M R, *et al.* Stability of swimming performance and activity hierarchies among wild largemouth bass at multiple temporal scales: Evidence for context-dependent shuffling between seasons [ J ]. Canadian Journal of Zoology, 2010, 88(3): 324 - 333.
- [29] Chappell M A, Bachman G C, Odell J P. Repeatability of maximal aerobic performance in Belding's ground squirrels, *Spermophilus beldingi* [ J ]. Functional Ecology, 1995, 9(3): 498 - 504.
- [30] Konarzewski M, Książek A, Łapo I B. Artificial selection on metabolic rates and related traits in rodents [ J ]. Integrative and Comparative Biology, 2005, 45(3): 416 - 425.
- [31] Pang X, Cao Z D, Peng J L, *et al.* The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 155 ( 2 ): 253 - 258.
- [32] Zhang W, Cao Z D, Fu S J. The effects of dissolved oxygen levels on the metabolic interaction between digestion and locomotion in Cyprinid fishes with different locomotive and digestive performances [ J ]. Journal of Comparative Physiology B, 2012, 182(5): 641 - 650.
- [33] Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, *et al.* The effect of dissolved oxygen levels on resting oxygen consumption and swimming performance in juvenile darkbarbel catfish *Peltebagnrus vachelli* [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(2): 255 - 261.
- [34] Fu C, Cao Z D, Fu S J. The effects of caudal fin loss and regeneration on the swimming performance of three cyprinid fish with different swimming capacities [ J ]. The Journal of Experimental Biology, 2013, 216 ( 16 ): 3164 - 3174.
- [35] Cant J P, McBride B W, Croom Jr W J. The regulation of intestinal metabolism and its impact on whole animal energetics [ J ]. Journal of Animal Science, 1996, 74(10): 2541 - 2553.
- [36] Collins A L, Anderson T A. The influence of changes in food availability on the activity of key degradative and metabolic enzymes in the liver and epaxial muscle of the golden perch [ J ]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(6): 1158 - 1165.
- [37] Hinch S G, Rand P S. Swim speeds and energy use of upriver-migrating sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): Role of local environment and fish characteristics [ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, 55(8): 1821 - 1831.
- [38] Weihs D. Optimal fish cruising speed [ J ]. Nature, 1973, 245(5419): 48 - 50.
- [39] Ware D M. Growth, metabolism, and optimal swimming speed of pelagic fish [ J ]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1975, 32(1): 33 - 41.
- [40] Hinch S G, Rand P S. Optimal swimming speeds and forward-assisted propulsion: Energy-conserving behaviours of upriver-migrating adult salmon [ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(12): 2470 - 2478.
- [41] Ohlberger J, Staaks G, Hölker F. Effects of temperature, swimming speed and body mass on standard and active metabolic rate in vendace (*Coregonus albula*) [ J ]. Journal of Comparative Physiology B, 2007, 177(8): 905 - 916.

## Repeatability and variation in locomotion metabolism of the juvenile southern catfish during starvation

ZENG Lingqing<sup>1,2</sup>, PENG Hanliuyi<sup>1</sup>, WANG Jianwei<sup>1</sup>, PANG Xu<sup>1</sup>, CAO Zhendong<sup>1,2</sup>, FU Shijian<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Animal Biology of Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Consistent individual differences (CIDs) in phenotypes, such as morphology, physiology and behaviour, are a surprisingly widespread phenomenon in most taxa of the animals. CIDs are individual differences in phenotype that are maintained over time (e. g. as measured by repeatability) and across contexts. Many studies showed that a potential linkage between standard metabolic rate (SMR) and other physiological traits (active metabolic rate and aerobic metabolic scope) exists among different taxa of the animals. To examine the effects of starvation on the intraspecific variation and repeatability of locomotion metabolism in a carnivorous fish, the juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) which is distributed widely in the Changjiang River and other water areas, was selected as the experimental fish. The resting metabolic rate ( $MO_{2rest}$ ) and active metabolic rate ( $MO_{2active}$ ) of both the starvation group [(12.15 ± 0.14) g, n = 29, starved for two weeks] and control group [(12.00 ± 0.23) g, n = 28, fed with 4%–5% body weight rice field eel meal every other day] were determined in trial I (before starvation) and trial II (after starvation) at (25 ± 0.5) °C. Additionally, the aerobic metabolic scope (AMS =  $MO_{2active}$  -  $MO_{2rest}$ ), cost of transports (COT) and optimal swimming speed ( $U_{opt}$ ) were also calculated during the course of the experiment to evaluate the adaptive strategy of locomotive metabolism in this fish species during food fluctuation. The results of our study showed the  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS of the starvation group decreased significantly by 8.6%, 36.3% and 44.1%, respectively, compared to trial I, whereas the  $MO_{2rest}$  of the control group increased by 25.9% and its  $MO_{2active}$  did not change during the course of experiment. This unparalleled change resulted in a 12.6% decrease in AMS in the control group in trial II. The coefficient of variance (CV) of the  $MO_{2rest}$  in the starvation group decreased while CV of the  $MO_{2active}$  and AMS increased in the same group. However, the corresponding index of the control group changed in a negative direction. The repeatability percentages of the  $MO_{2rest}$ ,  $MO_{2active}$  and AMS in the starvation group were all lower than those in the control group. The slope of linear regression equation for correlation between locomotor oxygen consumption rate ( $MO_2$ ) and swimming velocity in the starvation group did not change between two trials while the intercept of linear equation reduced profoundly. However, both the slope and intercept did not change in the control group between two trials. Starvation triggered a significant reduction in the repeatability in the locomotor  $MO_2$  in the *S. meridionalis*. The  $COT_{min}$  and  $U_{opt}$  reduced significantly by 25% and 11.3% in the starvation group, respectively. However, the control group showed a smaller decrease in the  $COT_{min}$  and  $U_{opt}$  which reduced by 8% and 4.8%, respectively, when compared to the starvation group. Our study suggested that the juvenile *S. meridionalis* not only exhibited the significant repeatability in  $MO_{2active}$ , AMS and locomotor  $MO_2$  with the exception of  $MO_{2rest}$ , but also decreased the optimal swimming speed and hence improved the swimming efficiency when this fish species was facing the low food availability conditions. Integrative regulation in swimming metabolic strategy in the southern catfish may be an adaptive consequence in a fluctuating food resources environment, and may result in an increase of survival for this fish species.

**Key words:** *Silurus meridionalis*; locomotion metabolism; starvation; intraspecific variation; repeatability; swimming

**Corresponding author:** FU Shijian. E-mail: shijianfu9@126.com