

饥饿对鲤幼鱼内脏器官指数和力竭运动后代谢特征的影响

李秀明 付世建 张耀光

EFFECTS OF STARVATION ON INDEX OF VISCERAL ORGANS AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION OF JUVENILE COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO*)

LI Xiu-Ming, FU Shi-Jian, ZHANG Yao-Guang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2019.167>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有氧运动训练和摄食对中华倒刺幼鱼力竭运动后代谢特征的影响

THE EFFECT OF AEROBIC EXERCISE TRAINING AND FEEDING ON EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION IN JUVENILE QINGBO (*SPINIBARBUS SINENSIS*)

水生生物学报. 2017, 41(2): 277–284 <https://doi.org/10.7541/2017.34>

力竭追赶训练对两种鲤科鱼类呼吸循环系统参数和力竭运动后代谢特征的影响

THE EFFECT OF EXHAUSTIVE CHASING TRAINING ON PARAMETERS OF RESPIRATORY AND CIRCULATORY SYSTEM AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION IN JUVENILE QINGBO (*SPINIBARBUS SINENSIS*) AND ROCK CARP (*PROCYPRIS RABAUDI*)

水生生物学报. 2019, 43(1): 78–85 <https://doi.org/10.7541/2019.010>

两种油脂水平下DHA强化对饥饿鲤体重及脂代谢的影响

THE EFFECT OF DHA FORTIFICATION ON BODY WEIGHT LOSS AND LIPID METABOLISM OF STARVED COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIOL.*) IN TWO DIETARY LIPID LEVELS

水生生物学报. 2018, 42(4): 744–750 <https://doi.org/10.7541/2018.091>

PFOS对中华倒刺幼鱼爆发游泳及运动后代谢恢复的影响

EFFECTS OF PFOS ON BURST SWIMMING PERFORMANCE AND METABOLIC RECOVERY IN JUVENILE *SPINIBARBUS SINENSIS*

水生生物学报. 2019, 43(2): 356–361 <https://doi.org/10.7541/2019.044>

两种油脂水平下DHA添加对鲤生长及脂质代谢的影响

EFFECT OF DHA ON THE GROWTH PERFORMANCE AND LIPID METABOLISM IN TWO DIETARY LIPID LEVELS OF COMMON CARP, *CYPRINUS CARPIOL.*

水生生物学报. 2018, 42(1): 123–130 <https://doi.org/10.7541/2018.016>

饥饿与重摄食对河蟹肠道菌群结构的影响

EFFECTS OF STARVATION AND REFEEDING ON INTESTINAL MICROFLORA OF CHINESE MITTEN CRAB (*ERIOCHEIR SINENSIS*)

水生生物学报. 2019, 43(4): 748–756 <https://doi.org/10.7541/2019.088>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2019.167

饥饿对鲤幼鱼内脏器官指数和力竭运动后代谢特征的影响

李秀明¹ 付世建¹ 张耀光²

(1. 重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331;

2. 西南大学淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为了考察不同饥饿时间对鲤幼鱼内脏器官指数和力竭运动后代谢特征的影响, 在(25±0.5)℃条件下, 将35尾实验鱼[体质量(21.34±0.42) g, 体长(9.39±0.08) cm]随机平均分成5组, 即: 对照组(S0)、1周(S1)、2周(S2)、4周(S4)和8周(S8)饥饿组, 相应时间的饥饿处理后测定各实验组鱼体内脏器官指数及力竭运动后过量耗氧(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)。结果发现: 除了体长以外, 鲤幼鱼体质量、空壳湿重、内脏团湿重、肝脏湿重、消化道湿重、心脏湿重和鳃湿重等均随着饥饿时间的延长呈下降趋势。S2、S4和S8组的幼鱼空壳指数显著高于S0和S1组($P<0.001$)。S2、S4和S8组的幼鱼内脏团指数和肝脏指数都显著低于S0和S1组($P<0.001$)。S1组幼鱼消化道指数显著低于S0组, 但显著高于S2、S4和S8组($P<0.001$)。心脏指数和鳃指数在所有实验组之间差异不显著($P>0.05$)。S1组幼鱼运动前代谢率显著低于S0组($P<0.001$), 但显著高于S2、S4和S8组($P<0.001$)。S1组幼鱼运动代谢峰值和代谢率增量与S1组差异不显著($P>0.05$), 但显著高于S0、S4和S8组($P<0.001$, $P=0.003$)。各组间幼鱼代谢峰值时间差异不显著($P>0.05$)。各个饥饿组幼鱼运动代谢峰值比率都显著高于S0组($P=0.002$)。S1组的幼鱼EPOC与S0和S2组的差异不显著($P>0.05$), 但显著高于S4和S8组($P=0.043$)。综上所述: (1) 鲤幼鱼各个组织器官对饥饿胁迫的响应不尽相同, 这可能与执行的生理功能差异有关; (2) 短期饥饿胁迫提升了鲤幼鱼有氧和无氧代谢能力, 这可能有利于其摄食和逃逸能力的提高, 进而提高其生存适合度。

关键词: 饥饿; 内脏器官指数; 运动后过量耗氧; 代谢率; 鲤

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)02-0259-08



由于食物资源分布的时空异质性, 野生动物经常面临食物匮乏甚至饥饿的胁迫。作为水生生态系统的重要组成部分, 鱼类通常表现出对长期饥饿环境的显著适应能力^[1]。一些鱼类能够忍受连续数月甚至一年的饥饿状态^[1-3]。长期的食物缺乏会导致鱼类组织器官形态结构、生理功能及行为模式产生适应性变化。大量研究发现, 饥饿通常会导致鱼类体重显著下降, 同时其消化器官结构会出现萎缩, 导致其消化功能的下调^[1, 3, 4]。但是由于鱼类生活习性的差异, 饥饿对鱼体各个组织器官的影响也不尽相同^[1, 5, 6]。

鱼类在逃避捕食者和穿越激流等生命活动的

过程中经常会达到力竭状态, 通常将力竭运动后恢复期间超过运动前耗氧水平的耗氧量称为力竭运动后过量耗氧(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)^[7, 8]。EPOC的相关参数包括力竭运动代谢峰值、峰值时间、代谢率增量和过量耗氧等^[9-11]。力竭运动代谢峰值(Peak post-exercise metabolic rate)可以作为鱼类最大有氧代谢能力的评价指标, 而代谢率增量(Increment of metabolic rate)代表着鱼类最大的有氧代谢空间, 过量耗氧(EPOC magnitude)则能够反映鱼类的无氧代谢能力^[12-14]。由于EPOC参数与鱼类的运动能力密切相关, 对其生存具有重要的生态学意义, 因此一直受到研究者的

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(31172096); 高等学校学科创新引智计划(111计划)建设项目(B14037); 重庆市科委重大项目(cstc2014yykfC80001); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2017jcyjAX0347)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31172096); the 111 Project (B14037); the Major Projects of Chongqing Science and Technology Committee (cstc2014yykfC80001); Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2017jcyjAX0347)]

作者简介: 李秀明(1979—), 男, 博士; 研究方向为鱼类生理生态和水产养殖。E-mail: xiumingli418@hotmail.com

通信作者: 张耀光, 教授; E-mail: zhangyg@swu.edu.cn

广泛关注^[7, 8, 15, 16]。鱼类EPOC特征不仅与其生活习性相关, 还受到流速、温度和营养状态等因素的显著影响^[10, 13, 15-17]。目前有关饥饿影响鱼类力竭运动后代谢特征的研究资料还相对较少^[9, 18]。

鲤(*Cyprinus carpio*)属于鲤形目, 鲤科, 是我国重要的淡水经济鱼类之一。有关饥饿对商品规格鲤消化道器官指数的影响已有报道^[19], 有关鲤幼鱼在饥饿过程中鱼体内脏器官指数和EPOC特征变化尚未有研究涉及。以鲤幼鱼为实验对象, 研究不同饥饿时间对其鱼体内脏器官指数和EPOC特征的影响, 以期丰富其饥饿生理学资料, 并为其生产实践提供必要的基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

鲤幼鱼购于重庆市北碚区歇马鱼种场。在室内循环水系统(2000 L)中驯养4周。驯养期间用颗粒饲料(四川通威集团, 成都)于每天09:00和17:00各饱足喂养1次, 饲料主要组成为(41.2±0.9)%粗蛋白质、(8.5±0.5)%粗脂肪、(25.7±1.2)%碳水化合物和(12.3±0.4)%灰分。养殖用水每天更换10%左右, 水温 and 溶氧分别控制在(25±0.5)°C和接近饱和(8 mg/L左右), 光周期制度设置为12L:12D。

1.2 实验方案

在驯养期结束后, 挑选大小均匀且健康的鲤幼鱼35尾[体重(21.34±0.42) g, 体长(9.39±0.08) cm], 随机平均分成5组, 即: 对照组(S0)、1周饥饿组(S1)、2周饥饿组(S2)、4周饥饿组(S4)和8周饥饿组(S8)(每组7尾实验鱼), 每尾实验鱼分别放置于单独的单元格内饥饿处理0、1、2、4和8周。在饥饿处理期间, 各处理组所有实验鱼均存活。实验期间水体温度、溶氧和光照周期等条件与驯养期间一致。

在相应的饥饿处理结束后, 将实验鱼单独放入鱼类流水式呼吸代谢仪的呼吸室(0.2 L)内驯化1d。用溶氧测定仪(HQ_{30d}, Hach Company, Loveland, CO, USA)测定其耗氧率作为其运动前代谢率(测定方法见后)。随后参考相关文献^[14]测定实验鱼的EPOC反应, 方法简述如下: 首先将实验鱼单独放入一个环形水道(体积约120 L, 流速约65 cm/s)中用手进行追赶2—3min, 当鱼体失去平衡或者触碰鱼体时不再有明显地应激反应时判定其达到力竭状态, 随后立即将实验鱼放回流水式呼吸代谢仪的呼吸室中并计时, 在达到力竭状态后的前10min内每分钟分别测定一次耗氧率, 在10—60min内每5min分别测定一次耗氧率, 最后测定计算各处理组

鲤幼鱼内脏指数。所有指标测定样本数均为7尾。

1.3 指标测量与参数计算

采用耗氧率作为实验鱼代谢率指标, 参考相关文献^[20]用自主研发的鱼类呼吸代谢仪测定完成。实验鱼代谢率[mg O₂/(kg·h)]计算公式如下:

$$R_m = \Delta O_2 \times f \quad (1)$$

式中, R_m (mg O₂/h)表示实验鱼的代谢率, ΔO_2 (mg O₂/L)表示装有实验鱼呼吸室和对照呼吸室(没有实验鱼)之间的溶氧差值。 f (L/h)表示呼吸室中的水流速度。为了消除各组实验鱼体质量差异较大造成的影响, 用0.75作为体质量系数将实验鱼代谢率标准化为1 kg体质量^[14, 20]。校正后代谢率计算公式如下:

$$R_s = (1/w)^{0.75} \times R_m \quad (2)$$

式中, R_s [mg O₂/(kg·h)]表示标准体重代谢率, w 表示实验鱼体重(kg)。

力竭运动前后实验鱼代谢率计算参数包括: (1)运动前代谢率[mg O₂/(kg·h)]: 实验鱼力竭运动前的代谢率; (2)运动代谢峰值[mg O₂/(kg·h)]: 实验鱼在力竭运动后恢复过程中观察到的最大代谢率; (3)峰值时间(min): 运动代谢峰值出现的时间; (4)代谢率增量[mg O₂/(kg·h)]: 力竭运动前代谢率和力竭运动后代谢峰值之间的差值; (5)峰值比率: 力竭运动前代谢率和力竭运动后代谢峰值之间的比值; (6)过量氧耗(mg O₂/kg): 实验鱼在力竭运动后恢复过程中各个时间点高于运动前代谢率的差值在时间上的积分。其具体计算方法参见相关参考文献^[13, 14]。

鲤幼鱼内脏器官指数的计算, 将EPOC测定结束后的单尾实验鱼放入麻醉剂(MS-222, 200 mg/L)溶液中麻醉致死。称鱼体质量后解剖分别将其心脏、鳃、内脏团、肝脏和消化道分别完整取出, 用微量天平称量(精确至0.0001 g)。各个内脏器官指数计算公式如下^[21]:

$$CM = BM - (HM + GM + VM) \quad (3)$$

$$CI = (CM/BM) \times 100 \quad (4)$$

$$VI = (VM/BM) \times 100 \quad (5)$$

$$LI = (LM/BM) \times 100 \quad (6)$$

$$DI = (DM/BM) \times 100 \quad (7)$$

$$HI = (HM/BM) \times 1000 \quad (8)$$

$$GI = (GM/BM) \times 1000 \quad (9)$$

式中, *CM*(Carcass mass)表示鱼体空壳湿重(g), *BM*(Body mass)表示鱼体湿重(g), *HM*(Heart mass)表示心脏湿重(g), *GM*(Gill mass)表示鳃湿重(g), *VM*(Visceral mass)表示内脏团湿重(g), *LM*(Liver mass)表示肝脏湿重(g), *DM*(Digestive tract mass)表示消化道湿重(g)。 *CI*(Carcass index)表示空壳指数(%), *VI*(Viscus index)表示内脏团指数(%), *LI*(Liver index)表示肝脏指数(%), *DI*(Digestive tract index)表示消化道指数(%), *HI*(Heart index)表示心脏指数(%), *GI*(Gill index)表示鳃指数(%)。

1.4 数据处理和统计分析

实验数据采用EXCELL(2007)进行常规计算, 用平均值±标准误(Mean±SE)表达, 采用SPSS17.0软件进行统计分析。饥饿对所有参数的影响采用单因素方差分析, 若差异显著则进行多重比较(LSD法), 显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 内脏器官指数

从表1可知, S2、S4和S8饥饿组的幼鱼*BM*显著小于S0组和S1饥饿组($P=0.020$), 实验鱼的*BL*在各个实验组之间差异不显著($P>0.05$)。S4和S8饥饿组的幼鱼*CM*显著小于S0组($P=0.039$), S2、S4和

S8饥饿组的幼鱼*CI*显著大于S0组和S1饥饿组($P<0.001$)。S1饥饿组的幼鱼*VM*显著小于对照组, 但却显著大于S2、S4和S8饥饿组, S2、S4和S8饥饿组的幼鱼*VI*显著小于S0组和S1饥饿组($P<0.001$)。S2饥饿组的幼鱼*LM*显著小于S0组和S1饥饿组, 但却显著大于S4和S8饥饿组, S2、S4和S8饥饿组的幼鱼*LI*显著小于S0组和S1饥饿组($P<0.001$)。S1饥饿组的幼鱼*DM*和*DI*显著小于S0组, 但却显著大于S2、S4和S8饥饿组($P<0.001$)。S2、S4和S8饥饿组的幼鱼*HM*显著小于S0组($P=0.006$), 但*HI*在所有实验组之间差异不显著($P>0.05$)。S8饥饿组的幼鱼*GM*显著小于S0组和S1饥饿组($P=0.038$), 但*GI*在所有实验组之间差异不显著($P>0.05$)。

2.2 力竭运动前代谢率

从表2可知, S1饥饿组的幼鱼运动前代谢率显著低于S0组, 但显著高于S2、S4和S8饥饿组($P<0.001$); S2饥饿组的幼鱼运动前代谢率显著低于S0组和S1饥饿组, 但显著高于S4和S8饥饿组($P<0.001$); S4和S8饥饿组的幼鱼运动前代谢率差异不显著($P>0.05$), 但显著低于S0组、S1和S2饥饿组($P<0.001$)。

2.3 力竭运动后代谢率特征

从图1可知, 所有组幼鱼力竭运动后的代谢率

表1 不同饥饿时间对鲤幼鱼内脏器官指数的影响($n=7$, 平均值±标准误)

Tab. 1 The effect of starvation on the index of visceral organs in juvenile *Cyprinus carpio* ($n=7$, Mean±SE)

参数Parameter	对照组S0	1周饥饿组S1	2周饥饿组S2	4周饥饿组S4	8周饥饿组S8	显著性Significance
体重Body mass (g)	21.34±0.97 ^a	19.18±0.42 ^{ab}	18.85±0.98 ^b	17.87±0.98 ^b	17.24±0.75 ^b	$F_{4,34}=3.432$; $P=0.020$
体长Body length (cm)	9.40±0.18	9.36±0.13	9.34±0.19	9.30±0.32	9.24±0.14	$F_{4,34}=0.518$; $P=0.723$
空壳湿重Carcass mass (g)	20.45±0.96 ^a	18.41±0.40 ^{ab}	18.28±0.94 ^{ab}	17.37±0.96 ^b	16.74±0.72 ^b	$F_{4,34}=2.887$; $P=0.039$
空壳指数Carcass index (%)	95.79±0.17 ^b	95.94±0.21 ^b	97.01±0.14 ^a	97.16±0.11 ^a	97.17±0.06 ^a	$F_{4,34}=21.236$; $P<0.001$
内脏团湿重Visceral mass (g)	0.89±0.02 ^a	0.78±0.04 ^b	0.57±0.05 ^c	0.50±0.02 ^c	0.49±0.03 ^c	$F_{4,34}=27.110$; $P<0.001$
内脏团指数Viscus index (%)	4.21±0.17 ^a	4.06±0.21 ^a	2.99±0.14 ^b	2.84±0.11 ^b	2.83±0.06 ^b	$F_{4,34}=21.236$; $P<0.001$
肝脏湿重Liver mass (g)	0.33±0.01 ^a	0.30±0.03 ^a	0.21±0.02 ^b	0.16±0.01 ^b	0.15±0.01 ^c	$F_{4,34}=22.402$; $P<0.001$
肝脏指数Liver index (%)	1.57±0.07 ^a	1.57±0.14 ^a	1.07±0.09 ^b	0.90±0.07 ^b	0.85±0.05 ^b	$F_{4,34}=15.468$; $P<0.001$
消化道湿重Digestive tract mass (g)	0.29±0.02 ^a	0.23±0.02 ^b	0.17±0.01 ^c	0.16±0.01 ^c	0.15±0.01 ^c	$F_{4,34}=19.646$; $P<0.001$
消化道指数Digestive tract index (%)	1.38±0.06 ^a	1.17±0.07 ^b	0.91±0.04 ^c	0.90±0.03 ^c	0.84±0.03 ^c	$F_{4,34}=20.739$; $P<0.001$
心脏湿重Heart mass (g)	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^{ab}	0.03±0.00 ^{bc}	0.03±0.00 ^{bc}	0.02±0.00 ^c	$F_{4,34}=4.442$; $P=0.006$
心脏指数Heart index (%)	1.45±0.04	1.47±0.04	1.41±0.06	1.39±0.04	1.42±0.05	$F_{4,34}=0.505$; $P=0.733$
鳃湿重Gill mass (g)	0.50±0.02 ^a	0.47±0.02 ^a	0.45±0.04 ^{ab}	0.44±0.04 ^{ab}	0.37±0.05 ^b	$F_{4,34}=2.918$; $P=0.038$
鳃指数Gill index (%)	23.56±0.68	24.29±0.94	23.45±1.36	24.46±1.39	21.37±0.93	$F_{4,34}=1.267$; $P=0.305$

注: 上标字母不同的同一行数值差异显著($P<0.05$); 下同

Note: Values in each row without a common superscript indicate significant difference ($P<0.05$). The same applies below

都表现为迅速上升,达到峰值后急剧下降并逐渐恢复到力竭运动前的代谢水平。从表2可知,S1饥饿组的幼鱼运动代谢峰值和代谢率增量与S2饥饿组差异不显著($P>0.05$),但显著高于S0组、S4和S8饥饿组($P<0.001$, $P=0.003$)。峰值时间在S0组和各个饥饿处理组之间差异不显著($P>0.05$)。各个饥饿处理组的峰值比率都显著高于S0组($P=0.002$)。S1饥饿组的过量耗氧与S0组和S2饥饿组之间差异不显著($P>0.05$),但显著高于S4和S8饥饿组($P=0.043$)。

3 讨论

3.1 饥饿对鲤幼鱼内脏器官指数的影响

本研究发现,饥饿导致鲤幼鱼体重和各个器官绝对重量的显著下降。这与南方鲇(*Silurus meridionalis*)^[3]、白鲟(*Acipenser transmontanus*)^[5]、红鲫(*Carassius auratus*)^[22]和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[23]等鱼类的研究结果相似。本研究表明,鲤幼鱼空壳指数随着饥饿时间的延长显著增加,而内脏团指数却显著下降。这表明饥饿过程中鲤幼鱼内脏组织器官重量的减少要快于骨骼和肌肉重量的降低。这种现象在白鲟^[5]和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[24]中也被发现。作为内脏器官的重要组成部分,鱼类消化系统相关组织器官往往最先对饥饿胁迫做出响应^[4]。处于饥饿状态的鱼类消化道重量大约会减少40%—60%,最大降幅可以达到74%^[3,4]。本研究发现,鲤幼鱼在8周的饥饿期间消化道湿重减少了48%,这与大多数研究结果相似。作为伏击捕食的大型肉食性鱼类,南方鲇饥饿8周后其消化道湿重显著下降,但消化道指数却显著增加,研究者认为消化系统结构和功能的相对保持可能更有利于其在恢复摄食后快速消化食物促进生长^[21]。本研究发现,鲤幼鱼的消化道湿重及其指数

在饥饿过程中都显著降低,暗示其消化系统结构和功能的快速下调,这可能与其较小的摄食量和频繁的摄食习性相关。肝脏作为一个重要的消化器官,也往往会受到食物资源变动的影响。有关商品规格鲤[体重(316.39±15.73)g]的研究发现,饥饿导致其肝脏指数呈现下降趋势^[19]。本研究也发现,鲤幼鱼[体重(21.34±0.42)g]肝脏指数随着饥饿时间的延长而显著降低,这可能与肝脏中能源物质的消耗和肝脏细胞的萎缩有关。这与南方鲇^[3]、白鲟^[5]、虹鳟^[25]、褐菖鲈(*Sebastiscus marmoratus*)^[26]和鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[27]的研究结果相似。心脏和鳃是鱼类循环和呼吸系统重要的组成部分,其形态和功能受到各种内在和外在因素的显著影响^[28,29]。南方鲇在经过8周的饥饿处理后其心脏和鳃指数都显著增加^[21]。本研究发现,长期饥饿处理却并没有对鲤幼鱼心脏和鳃指数产生显著影响,其心脏和鳃相对大小及其功能的维持可能有利于其游泳等日常活动的实现。这种现象在Petersen等^[25]对虹鳟的研究中也被发现。总体而言,在饥饿环境条件下鱼类各个器官指数变化并不一致,这可能与其种类和各个器官功能差异相关。

3.2 饥饿对鲤幼鱼力竭运动前后代谢特征的影响

运动前代谢率也可称为静止代谢率,作为鱼类的一个基本生理参数,它代表着鱼类进行气体交换、体液循环、蛋白质合成、离子梯度维持和渗透作用等基本生命活动的日常能量消耗^[30,31]。大量研究发现,鱼类会下调各种生理功能,降低日常的维持代谢耗能以应对饥饿环境胁迫^[21,32,33]。一些鱼类在面临饥饿环境时其静止代谢率表现出阶段性下降的特征。比如南方鲇静止代谢率在饥饿前期显著降低,但在饥饿15—32d期间基本维持不变^[3]。鳞南乳鱼(*Lepidogalaxias salamandroides*)下

表2 不同饥饿时间对鲤幼鱼力竭运动后代谢参数的影响($n=7$, 平均值±标准误)

Tab. 2 Excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) response in juvenile *Cyprinus carpio* after starvation ($n=7$, Mean±SE)

参数Parameter	对照组S0	1周饥饿组S1	2周饥饿组S2	4周饥饿组S4	8周饥饿组S8	显著性Significance
运动前代谢率 Pre-exercise metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	59.14±2.11 ^a	52.50±2.69 ^b	42.33±2.40 ^c	35.34±1.09 ^d	29.59±1.48 ^d	$F_{4,34}=35.227$; $P<0.001$
运动代谢峰值 Peak post-exercise metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	247.28±9.88 ^{bc}	290.32±18.94 ^a	266.78±17.77 ^{ab}	210.44±9.56 ^{cd}	195.90±8.85 ^d	$F_{4,34}=8.089$; $P<0.001$
峰值时间 Time to MO ₂ peak (min)	1.86±0.34	2.00±0.22	1.86±0.26	1.71±0.29	1.43±0.29	$F_{4,34}=0.585$; $P=0.676$
代谢率增量 Increment of metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	188.14±8.72 ^{bc}	237.82±19.52 ^a	224.45±18.58 ^{ab}	175.10±9.63 ^c	166.31±9.01 ^c	$F_{4,34}=5.008$; $P=0.003$
峰值比率Factorial scope	4.19±0.14 ^b	5.63±0.50 ^a	6.44±0.57 ^a	5.99±0.32 ^a	6.73±0.46 ^a	$F_{4,34}=5.490$; $P=0.002$
过量耗氧 EPOC magnitude (mg O ₂ /kg)	44.53±4.23 ^{ab}	61.42±9.57 ^a	50.65±9.65 ^{ab}	39.98±4.66 ^b	31.14±2.53 ^b	$F_{4,34}=2.805$; $P=0.043$

降的静止代谢率在饥饿20—40d期间也没有显著变化^[34]。鲇(*Silurus asotus*)在饥饿1、2、4、8周后静止代谢率分别显著降低26%、26%、35%和55%。在饥饿后1—4周内静止代谢率无显著差异, 出现一个相对稳定的“平台期”^[18], 饥饿前期日常代谢耗能的维持可能更加有利于恢复摄食后各项生理功能的快速启动。本研究发现, 鲤幼鱼在饥饿1、2、4、8周后静止代谢率分别显著降低12%、29%、40%和50%, 静止代谢率相对稳定的“平台期”出现在4—8周。饥饿前期日常代谢耗能显著下降可能有利于快速地减少日常能量消耗, 这可能是鲤幼鱼应对饥饿胁迫环境的生理策略之一。不同生活习性鱼类在饥饿条件下的静止代谢率下降模式各不

相同, 这也反映出鱼类克服食物匮乏逆境的各种适应性策略的差异。

鱼类在力竭运动后代谢峰值和代谢率增量是其有氧代谢能力的重要评价指标^[13, 14]。有研究发现, 一些鱼类运动代谢峰值和代谢率增量在饥饿期间往往呈现逐步降低的变化趋势, 暗示其最大有氧代谢能力的下降和有氧代谢空间的压缩, 进而限制其游泳运动等生理功能的执行, 比如尼罗罗非鱼和南方鲇^[9, 33]。本研究表明, 随着饥饿时间的延长, 鲤幼鱼运动代谢峰值和代谢率增量都呈现先升高后下降的变化趋势。运动代谢峰值在饥饿1和2周后分别增加了17%和8%, 饥饿4和8周后则分别下降了14%和20%。代谢率增量在饥饿1和2周后分别增加

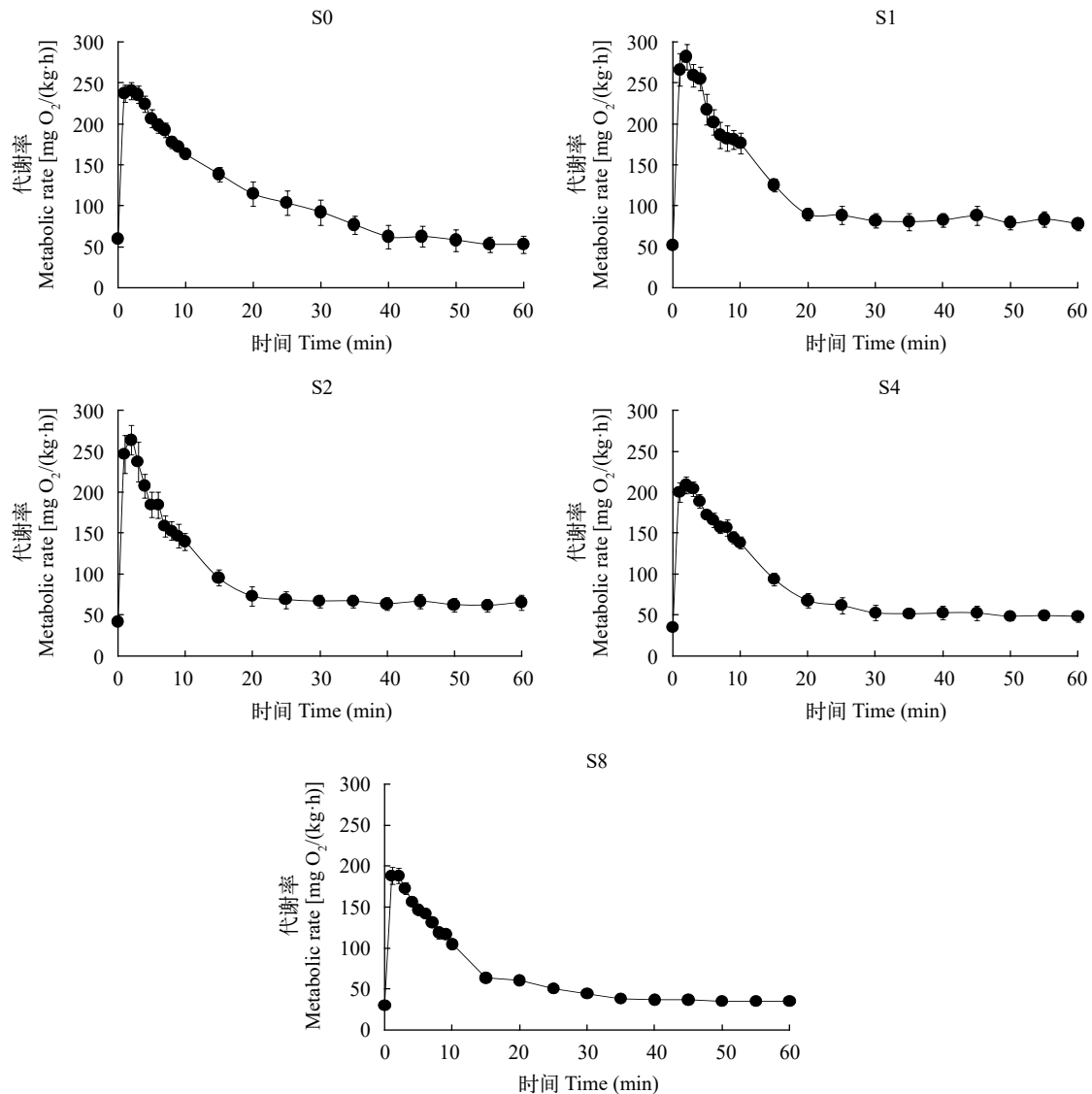


图1 不同饥饿时间对鲤幼鱼力竭运动后代谢的影响($n=7$, 平均值 $\pm$ 标准误)

Fig. 1 Excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) in juvenile *Cyprinus carpio* after starvation ($n=7$, Mean $\pm$ SE)

S0. 对照组; S1. 1周饥饿组; S2. 2周饥饿组; S4. 4周饥饿组; S8. 8周饥饿组

S0. control group; S1. 1 week starved group; S2. 2 weeks starved group; S4. 4 weeks starved group; S8. 8 weeks starved group

了26%和19%, 饥饿4和8周后则分别下降了7%和11%。由此表明, 短期饥饿促进了鲤幼鱼最大有氧代谢能力的改善和有氧代谢空间的扩大, 这可能有利于其觅食和运动等生理功能的进行。这与鲇的饥饿研究结果相似^[18]。

鱼类无氧运动能力与其穿越激流、伏击捕食及逃避敌害等生命活动密切相关。作为评价鱼类无氧运动能力的重要指标, EPOC也受到多种生态因素的显著影响^[9-11, 15]。迄今为止, 饥饿对鱼类EPOC的影响并没有得出一致的结论。尼罗罗非鱼EPOC在6周饥饿期间逐步降低^[9]。南方鲇EPOC在饥饿5d后出现显著提高^[10]。关于鲇的研究发现, 饥饿1、2、4周后其EPOC显著增加了145%、122%和126%, 研究者认为这可能是一种饥饿的补偿效应, 其持续时间约为3周^[18]。本研究发现, 饥饿虽然没有对鲤幼鱼的EPOC产生显著性影响, 但总体上也呈现出先增加后降低的趋势。EPOC在饥饿1和2周后分别增加了39%和14%, 在饥饿4和8周后则分别下降了10%和30%。由此表明, 短期饥饿可能导致鲤幼鱼无氧代谢能力的提升, 进而提高其无氧运动能力, 这可能是其对食物短缺环境的适应策略之一。

致谢:

感谢西南大学生命科学学院蒲德永老师和2010级本科生舒小娟同学对实验的帮助。

参考文献:

- [1] Bar N. Physiological and hormonal changes during prolonged starvation in fish [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2014, **71**(10): 1447-1458.
- [2] Jezierska B, Hazel J R, Gerking S D. Lipid mobilization during starvation in the rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson, with attention to fatty acids [J]. *Journal of Fish Biology*, 1982, **21**(6): 681-692.
- [3] 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 A*, 2012, **162**(3): 200-211.
- [4] Zaldúa N, Naya D E. Digestive flexibility during fasting in fish: a review [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2014(169): 7-14.
- [5] Hung S S O, Liu W, Li H, et al. Effect of starvation on some morphological and biochemical parameters in white sturgeon, *Acipenser transmontanus* [J]. *Aquaculture*, 1997, **151**(1-4): 357-363.
- [6] Ashouri G, Yavari V, Bahmani M, et al. The effect of short-term starvation on some physiological and morphological parameters in juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* (Actinopterygii: Acipenseriformes: Acipenseridae) [J]. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 2013, **43**(2): 145.
- [7] Børsheim E, Bahr R. Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption [J]. *Sports Medicine*, 2003, **33**(14): 1037-1060.
- [8] Gaesser G A, Brooks G A. Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1984, **16**(1): 29-43.
- [9] Luo Y, Wang W, Zhang Y, et al. Effects of starvation on the excess post-exercise oxygen consumption of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2013, **45**(5): 333-342.
- [10] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of feeding and fasting on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2007, **146**(3): 435-439.
- [11] Zeng L Q, Zhang Y G, Cao Z D, et al. Effect of temperature on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) following exhaustive exercise [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2010, **36**(4): 1243-1252.
- [12] Kieffer J D, Wakefield A M, Litvak M K. Juvenile sturgeon exhibit reduced physiology responses to exercise [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**(24): 4281-4289.
- [13] Li X M, Yuan J M, Zhang Y G, et al. The effect of aerobic exercise training and feeding on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(2): 277-284. [李秀明, 袁建明, 张耀光, 等. 有氧运动训练和摄食对中华倒刺鲃幼鱼力竭运动后代代谢特征的影响 [J]. *水生生物学报*, 2017, **41**(2): 277-284.]
- [14] Li X M, Zhang Y G, He C M, et al. The effect of exhaustive chasing training on parameters of respiratory and circulatory system and excess post-exercise oxygen consumption in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) and rock carp (*Procypris rabaudi*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(1): 78-85. [李秀明, 张耀光, 何春梅, 等. 力竭追赶训练对两种鲤科鱼类呼吸循环系统参数和力竭运动后代代谢特征的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(1): 78-85.]
- [15] Liu Y, Cao Z D, Fu S J, et al. The effect of exhaustive chasing training and detraining on swimming performance in juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*) [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2009, **179**(7): 847-855.
- [16] Li K G, Cao Z D, Fu S J. Effect of feeding on excess

- post-exercise oxygen consumption in juvenile Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(6): 1036-1040. [李可贵, 曹振东, 付世建. 摄食对鲢鱼幼鱼力竭性运动后过量耗氧的影响 [J]. 水生生物学报, 2012, **36**(6): 1036-1040.]
- [17] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, *et al.* Effect of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2009, **179**(4): 509-517.
- [18] Tang H F, Cao Z D, Fu S J. The relationship among resting metabolic rate, body composition and excess post-exercise oxygen consumption during fasting in *Silurus asotus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(1): 190-195. [汤洪芬, 曹振东, 付世建. 饥饿过程鲢鱼幼鱼静止代谢, 身体组成及与力竭性运动后过量耗氧的关系 [J]. 水生生物学报, 2010, **34**(1): 190-195.]
- [19] Feng G N, Yang W P, Wang A M, *et al.* Effects of starvation stress on body shape, chemical composition and blood physiological of *Cyprinus carpio* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, **20**(6): 814-819. [封功能, 杨文平, 王爱民, 等. 饥饿胁迫对鲤形体, 体成分及血液生理指标的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2011, **20**(6): 814-819.]
- [20] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of meal size on post-prandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2006, **176**(5): 489-495.
- [21] Li X M, Liu L, Yuan J M, *et al.* The effect of aerobic exercise and starvation on growth performance and postprandial metabolic response in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2016(193): 36-44.
- [22] Wu M M, Li J F, Gao H T. Effects of starvation and compensated growth on growth and body composition of juvenile *Carassius auratus* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **2**(5): 80-84. [吴蒙蒙, 李吉方, 高海涛. 饥饿和补偿生长对红鲫幼鱼生长和体组分的影响 [J]. 水生生态学杂志, 2009, **2**(5): 80-84.]
- [23] Abdel-Tawwab M, Khatib Y A E, Ahmad M H, *et al.* Compensatory growth, feed utilization, whole-body composition, and hematological changes in starved juvenile Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 2006, **18**(3): 17-36.
- [24] Storebakken T, Hung S S O, Calvert C C, *et al.* Nutrient partitioning in rainbow trout at different feeding rates [J]. *Aquaculture*, 1991, **96**(2): 191-203.
- [25] Petersen L H, Dzialowski E, Huggett D B. The interactive effects of a gradual temperature decrease and long-term food deprivation on cardiac and hepatic blood flows in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2011, **160**(3): 311-319.
- [26] Jiang L H, Zhu A Y, Yuan S B. Effects of starvation on digestive enzyme activity and digestive tract index in dusky stingfish *Sebastiscus marmoratus* [J]. *Fisheries Science*, 2011, **30**(4): 187-191. [江丽华, 朱爱意, 苑淑宾. 饥饿对褐菖鲉消化道指数及消化酶活力的影响 [J]. 水产科学, 2011, **30**(4): 187-191.]
- [27] Qian Y X. Effect of starvation on protease activities of cultured *Laterolabrax japonicus* [J]. *Fisheries Science*, 2002, **21**(3): 6-7. [钱云霞. 饥饿对养殖鲈蛋白酶活力的影响 [J]. 水产科学, 2002, **21**(3): 6-7.]
- [28] Gamperl A K, Farrell A P. Cardiac plasticity in fishes: environmental influences and intraspecific differences [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(15): 2539-2550.
- [29] Laurent P, Perry S F. Environmental effects on fish gill morphology [J]. *Physiological Zoology*, 1991, **64**(1): 4-25.
- [30] Johnston I A. Growth and metabolism in Antarctic fish [J]. *Antarctic Special Topic*, 1993(2): 141-150.
- [31] 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]. *Journal of Experimental Biology*, 2011, **214**(10): 1668-1675.
- [32] Méndez G, Wieser W. Metabolic responses to food deprivation and refeeding in juveniles of *Rutilus rutilus* (Teleostei: Cyprinidae) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1993, **36**(1): 73-81.
- [33] 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 A*, 2011, **158**(4): 498-505.
- [34] Pusey B J. The effect of starvation on oxygen consumption and nitrogen excretion in *Lepidogalaxias salaman-droides* (Mees) [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 1986, **156**(5): 701-705.

EFFECTS OF STARVATION ON INDEX OF VISCERAL ORGANS AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION OF JUVENILE COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO*)

LI Xiu-Ming¹, FU Shi-Jian¹ and ZHANG Yao-Guang²

(1. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To investigate the effects of starvation on visceral organs and excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*), the body mass and body length of 35 fish with (21.34 ± 0.42) g and (9.39 ± 0.08) cm were randomly divided into 5 groups, i.e., control group (S0), 1 week starvation group (S1), 2 week starvation group (S2), 4 week starvation group (S4) and 8 week starvation group (S8). The results indicated that body mass, carcass mass, visceral mass, liver mass, digestive tract mass, heart mass and gill mass of juvenile *C. carpio* significantly decreased with the increased starvation period. Starvation have no effect on the body length, heart and gill indexes of *C. carpio* ($P > 0.05$). Carcass index significantly increased in S2, S4 and S8 groups compared to those in S0 and S1 groups ($P < 0.001$). Viscus and liver indexes significantly decreased in S2, S4 and S8 groups compared to those in S0 and S1 groups ($P < 0.001$). The digestive tract index in S1 group was significantly lower than that of S0 group, but was significantly higher than those of S2, S4 and S8 groups ($P < 0.001$). Pre-exercise metabolic rate in S1 group was significantly lower than that of S0 group, but was significantly higher than those of S2, S4 and S8 groups ($P < 0.001$). The peak post-exercise metabolic rate and increment of metabolic rate in S1 group were significantly higher than those of S0, S4 and S8 groups ($P < 0.001$, $P = 0.003$). There was no significant difference in the time to MO_2 peak of *C. carpio* among group ($P > 0.05$). Factorial scopes in starved groups were significantly higher than that of S0 group ($P = 0.002$). The magnitude of EPOC in S1 group was significantly higher those of S4 and S8 groups ($P = 0.043$). Our results suggested that organs/tissues responded differently to starvation due to the different physiological roles, and that short-term starvation significantly increased aerobic and anaerobic capacity to improve feeding and escaping ability in juvenile *C. carpio*.

Key words: Starvation; Index of visceral organs; Excess post-exercise oxygen consumption; Metabolic rate; *Cyprinus carpio*