

饥饿对南方鲇和草鱼的生长及能量代谢的影响^①

夏媛香, 邱汉勋, 闫玉莲

西南大学 生命科学学院 水生生物及水环境研究所/淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要:以南方鲇(*Silurus meridionalis*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)为对象,在(27.5±0.5)℃条件下,分别饥饿 0 d,3 d,7 d,14 d,21 d 和 28 d,观察各实验处理对鱼体的生长及能量代谢的影响。研究发现:在饥饿 28 d 后,2 种鱼的体质量、体长无显著变化,但各自的肥满度和肝器官指数均显著降低($p<0.05$),南方鲇脂肪含量的降低幅度大于草鱼,其蛋白含量的降低幅度却小于草鱼。各饥饿处理时间点的草鱼静止代谢率(RMR)均显著高于南方鲇($p<0.05$),且随饥饿时间的延长呈直线下降的趋势;而南方鲇的 RMR 则呈先上升再下降的趋势。2 种鱼的特定体质量生长率(SGR)在饥饿进程中均呈负增长,南方鲇和草鱼的各线粒体状态 3 呼吸率和细胞色素 C 氧化酶活性随饥饿时间延长均表现出了不同的变化的趋势。以上结果表明,南方鲇和草鱼应对饥饿胁迫的生理生态学机制存在组织特异性和物种特异性。通过讨论提出,由于南方鲇与草鱼为不同的营养类型,尤其是捕食行为模式各异,因此进化出不同的适应饥饿胁迫的能量生态对策。

关键词:南方鲇(*Silurus meridionalis*);草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*);饥饿胁迫;生长参数;静止代谢;线粒体代谢;能量生态对策

中图分类号: Q174

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)06-0102-08

在复杂多变的自然环境中鱼体常因迁移洄游、食物分布的不均、季节的变化或其它环境突变等自然因素不得不面临食物短缺并忍受饥饿^[1]。在天然水域中,饥饿是鱼类常面临的一种生理胁迫;在人工养殖环境下,也常因大规模养殖技术不精、对鱼类生长条件的控制疏忽等人为因素而导致其进食缺乏^[2]。已有研究报道了饥饿对鱼体的生长状态、组织结构、亚细胞结构及多项生理生化指标等不同程度的影响^[3-6],以及饥饿后恢复进食的补偿效应及相关生理机制^[7-8]。南方鲇(*Silurus meridionalis*)是一种生长于长江、珠江等流域,具有经济价值的肉食性底栖鱼类。本实验室对南方鲇的能量代谢、生长发育和生物营养需求等进行了系统的研究^[9-11]。草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)是典型的草食性鱼类,它具有分布广泛、习性活泼和游泳迅速等特点。2 种鱼的摄食模式有明显差异,南方鲇作为典型的伏击捕食性鱼类,静止代谢率相对较低;草鱼作为寻食性鱼类,摄食活动频繁,因而运动代谢水平比较高^[12]。南方鲇和草鱼具有不同的食性、摄食模式和营养层级,其饥饿耐受情况各有代表性。近年来关于鱼类在饥饿胁迫下的能量分配模式的适应性改变,以及相关的生理生态学机制的研究,已有少量报道^[7,13-14],但尚缺乏足够的实验资料进行深入的理论探讨。本研究观测了饥饿对南方鲇和草鱼静止代谢、生长参数、器官指数、鱼体组分和线粒体呼吸代谢的影响,比较南方鲇和草鱼这 2 种不同营养类型鱼类在细胞、器官和个体水平方面应对饥饿的生理生态学机制,拟为该领域研究提供新的基础资料。

① 收稿日期:2018-01-21

基金项目:重庆市自然科学基金项目(cstc2013jjB80008);中央高校基本科研业务费专项基金项目(XDJK2016C156)资助。

作者简介:夏媛香(1992-),女,硕士研究生,主要从事鱼类生理生态学研究。

通信作者:闫玉莲,副教授,硕士研究生导师。

1 材料方法

1.1 实验鱼的来源与驯化

选取由西南大学水产科学研究所 2016 年春季人工繁殖的同批次南方鲇幼鱼(体质量 (45.85 ± 3.82) g, 体长 (17.56 ± 0.57) cm)和购买于北碚歇马渔场当年同批次人工孵化培育的草鱼幼鱼(体质量 (47.51 ± 2.87) g, 体长 (14.1 ± 0.3) cm)为研究对象. 实验开始前, 将实验幼鱼放在室内循环水养殖系统进行驯化养殖. 驯化 2 周后, 各选取 200 尾初始体质量相近、体表无损伤的实验鱼进行饥饿处理, 每种鱼采用 2 套循环水养殖系统, 每套系统由 10 个养殖单元组成, 每个养殖单元 10 尾鱼(养殖单元的规格: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=42$ cm $\times$ 29 cm $\times$ 25 cm). 驯化期间南方鲇以切碎的冰冻白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)肌肉为饵料, 每两天(20:00)投喂一次, 达到饱足, 喂食 0.5 h 后, 捞除剩余饵料. 草鱼以商业饲料(重庆新希望饲料有限公司)每天 8:30 和 17:00 各投喂一次, 达到饱足, 喂食 0.5 h 后, 捞除剩余饵料. 驯化和实验期间, 每两天换去水总体积的 2/3, 水温控制为 (27.5 ± 0.5) °C, 光周期为 12L:12D. 实验鱼在饥饿时间第 0 天、第 3 天、第 7 天、第 14 天、第 21 天和第 28 天时分别取样进行实验指标测定, 每个时间点各取样 10 尾鱼.

1.2 生长性能相关指标的计算公式

特定体质量生长率(SGRW, %/d) $=100(\ln W_t - \ln W_0)/t$, 肥满度(CF, %) $=100 \times W_t/L^3$

肝指数(HIS, %) $=100 \times H/W_t$

肾指数(KIS, %) $=100 \times K/W_t$

心指数(H_rIS, %) $=100 \times H_r/W_t$

脑指数(BIS, %) $=100 \times B/W_t$

其中, t , W_t , W_0 , L , H , K , H_r , B , 分别代表饥饿时间(d)、终末体质量(g)、初始体质量(g)、体长(cm)肝重(g)、肾重(g)、心重(g)和脑重(g).

1.3 静止代谢的测定

采用西南大学水生生物与水环境研究所设计的鱼类流水式呼吸仪及相应的方法测定实验鱼的耗氧率^[9]. 在饥饿时间为 0 天、3 天、7 天、14 天、21 天和 28 天时各随机选取样 10 尾南方鲇和草鱼作为测定对象, 水温控制在 (27.5 ± 0.5) °C.

1.4 鱼体组分测定

在各饥饿时间点分别随机选取 10 尾南方鲇和草鱼用于进行组分分析. 将实验鱼在 70 °C 下烘干至恒质量, 即测得实验鱼的水分含量, 然后用研钵将鱼体磨成细粉后进行其它组分的测定. 粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定, 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定, 灰分用马弗炉于 550 °C 灼烧后测定.

1.5 鱼体器官组织线粒体代谢指标的测定

组织线粒体的提取采用静止代谢测定结束后的实验鱼体作为组织线粒体的取样鱼体, 线粒体的提取、呼吸率及细胞色素 C 氧化酶活性的测定的具体过程参照 Yan & Xie^[10]的方法进行, 测定温度为 27.5 °C.

组织线粒体蛋白含量采用考马斯亮蓝法进行测定^[15].

1.6 数据处理方法

采用 Excel2011 进行数据整理, SPSS Statistics22.0 软件对数据进行分析. 数据符合方差齐性, 采用单因素方差分析(ANOVA)的 LSD 法进行差异性检验, 否则采用非参数检验的 Kruskal-Wallis 法, 以 $p < 0.05$ 作为差异有统计学意义水平.

2 实验结果

2.1 饥饿对 2 种实验鱼的体质量、体长、肥满度及器官指数的影响

与初始状态时相比, 2 种鱼各自的体质量、体长在饥饿 28 天后均无显著变化(表 1). 2 种鱼各自的肥满度、肝器官指数和肾器官指数在饥饿 28 天之后均显著降低($p < 0.05$)(表 1). 2 种鱼的心器官指数和脑器官指数在在饥饿 28 天之后与其初始状态时差异无统计学意义(表 1).

表 1 饥饿对南方鲇和草鱼体质量、体长、肥满度和器官指数的影响(%湿质量)

鱼种	体质量/g	体长/cm	肥满度/%	器官指数/%				
				肝	肾	心	脑	
饥饿 0 天								
南方鲇	45.85 ±3.82	17.56 ±0.57 ^x	0.84 ±0.02 ^{ay}	0.88 ±0.04 ^{ay}	0.39 ±0.01 ^{ax}	0.16 ±0.01 ^x	0.47 ±0.03 ^x	
草 鱼	47.51 ±2.87	14.18 ±0.30 ^y	1.66 ±0.03 ^{ax}	1.17 ±0.08 ^{ax}	0.32 ±0.01 ^{ay}	0.13±0 ^y	0.26 ±0.01 ^y	
饥饿 28 天								
南方鲇	40.33 ±3.24	17.47 ±0.61 ^x	0.76 ±0.03 ^{by}	0.51 ±0.03 ^b	0.20 ±0.01 ^b	0.12 ±0	0.47 ±0.02 ^x	
草 鱼	41.79 ±2.78	14.1 ±0.34 ^y	1.48 ±0.03 ^{bx}	0.53 ±0.02 ^b	0.19 ±0.01 ^b	0.12 ±0	0.28 ±0.01 ^y	

注：数据用平均值±标准误表示(*Mean* ± *SE* 表示, *n*=10); a, b: 同列数据中带有不同上标字母表示饥饿影响鱼体内体质量、体长、肥满度和器官指数的差异有统计学意义(*p*<0.05). x, y: 同列数据中带有不同上标字母表示鱼体种间体质量、体长、肥满度和器官指数的差异有统计学意义(*p*<0.05).

2.2 不同饥饿时间对南方鲇和草鱼鱼体组份的影响

南方鲇蛋白含量在饥饿前后变化不明显, 而草鱼蛋白含量在饥饿 28 天之后显著降(*p*<0.05); 草鱼蛋白含量在饥饿前显著高于南方鲇(*p*<0.05), 但饥饿 28 天之后前者却显著低于后者(*p*<0.05, 表 2). 草鱼粗脂肪含量在饥饿前后均显著的高于南方鲇(*p*<0.05); 在饥饿 28 天之后, 2 种鱼的脂肪含量均显著降低(*p*<0.05, 表 2). 草鱼的灰分含量在饥饿前后均高于南方鲇, 但饥饿处理引起 2 种鱼灰分含量的变化不明显. 南方鲇水分含量在饥饿后显著增加(*p*<0.05), 南方鲇的水分含量在饥饿前显著高于草鱼(*p*<0.05), 而在饥饿后二者的差异却不明显(表 2).

表 2 饥饿对南方鲇、草鱼的鱼体组分的影响(%湿质量)

鱼种	组 份			
	蛋白质/%	粗脂肪/%	灰分/%	水分/%
饥饿 0 天				
南方鲇	11.68 ± 0.16 ^y	1.89 ± 0.25 ^{ay}	2.48 ± 0.14 ^y	81.3 ± 0.94 ^{bx}
草 鱼	12.71 ± 0.22 ^{ax}	5.01 ± 0.55 ^{ax}	3.38 ± 0.07 ^x	75.2 ± 0.68 ^y
饥饿 28 天				
南方鲇	12.14 ± 0.32 ^x	0.62 ± 0.06 ^{by}	2.39 ± 0.06 ^y	85.75 ± 0.25 ^a
草 鱼	10.99 ± 0.25 ^{by}	2.14 ± 0.6 ^{bx}	3.69 ± 0.14 ^x	78.2 ± 3.43

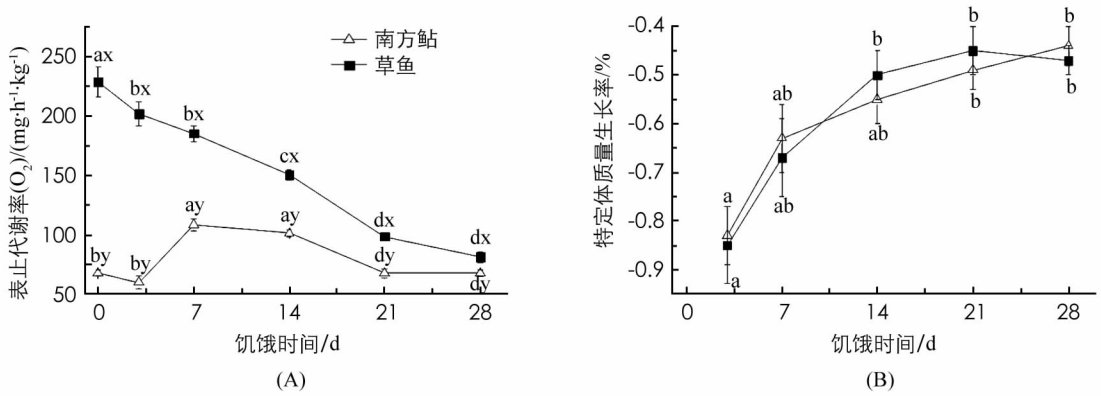
注：数据用(平均值±标准误)表示(*Mean*±*SE* 表示, *n*=10); a, b: 同列数据中带有不同上标字母表示饥饿影响鱼体内组分的差异有统计学意义(*p*<0.05). x, y : 同列数据中带有不同上标字母表示鱼体种间组分差异有统计学意义(*p*<0.05).

2.3 饥饿时间对南方鲇和草鱼静止代谢(RMR)、特定体质量生长率(SGR)的影响

草鱼的 RMR 高于南方鲇, 且在所有饥饿时间取样点的检测值均存在显著的种间差异(*p*<0.05, 图 1A). 草鱼的 RMR 随饥饿时间的延长, 表现出下降趋势, 并在饥饿 3 天后与初始状态达到显著差异(*p*<0.05). 南方鲇的 RMR 随饥饿时间的延长有先上升再下降, 而在饥饿时间 7 天至 14 天时段显著高于初始状态及饥饿 3 天、21 天和 28 天的水平(*p*<0.05). 2 种鱼的 SGR 都随着饥饿时间延长都呈现负增长, 并且降幅逐渐减小; 2 种鱼的 SGR 在各饥饿时段的种间差异不显著(图 1B).

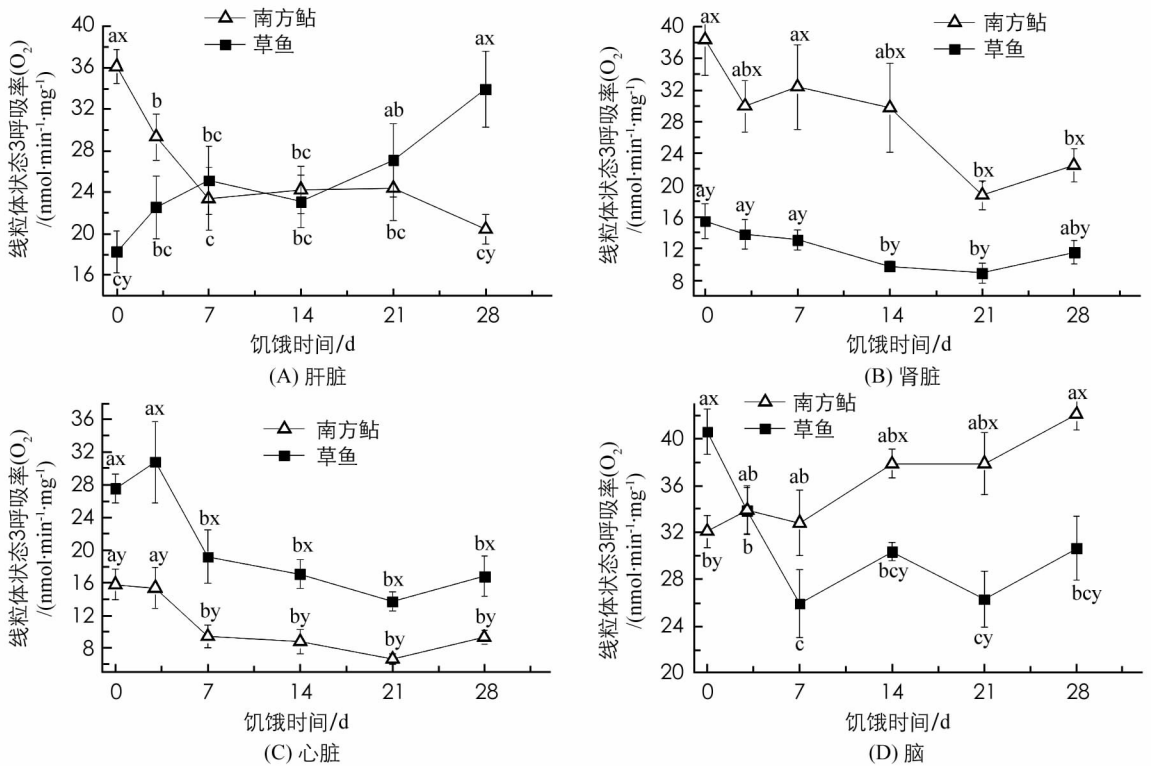
2.4 饥饿时间对各组织线粒体呼吸率的影响

南方鲇肝脏线粒体状态 3 呼吸率随着饥饿时间延长呈降低的趋势(图 2A), 草鱼的该指标则随饥饿时间的延长有升高的趋势, 在饥饿 21 天之后该指标的升高达到显著水平(*p*<0.05); 南方鲇的该值在饥饿前显著高于草鱼, 而在饥饿 28 天之后却显著低于草鱼(*p*<0.05, 图 2A). 2 种鱼的肾脏线粒体状态 3 呼吸率随饥饿时间的延长均呈下降趋势(图 2B); 南方鲇的该指标在所有饥饿时间段均显著高于草鱼(*p*<0.05, 图 2B). 南方鲇和草鱼心脏线粒体状态 3 呼吸率随着饥饿时间延长均呈降低趋势(图 2C); 草鱼的该值在每个饥饿时间段均显著高于南方鲇(*p*<0.05). 草鱼脑组织的线粒体状态 3 呼吸率随着饥饿时间延长有下降趋势; 而南方鲇的该指标随饥饿时间延长有上升的趋势; 前者在饥饿前显著高于后者, 但在饥饿 14 天之后却显著低于后者(*p*<0.05, 图 2D).



注: 数据用(平均值 $\pm$ 标准误)表示($Mean \pm SE$ 表示, $n=10$); a, b, c: 数据中带有不同上标字母表示饥饿影响鱼体种内静止代谢、特定体质量生长率的差异有统计学意义($p < 0.05$). x, y: 数据中带有不同上标字母表示鱼体种间静止代谢、特定体质量生长率差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 1 饥饿对南方鲇、草鱼静止代谢和特定体质量生长率的比较

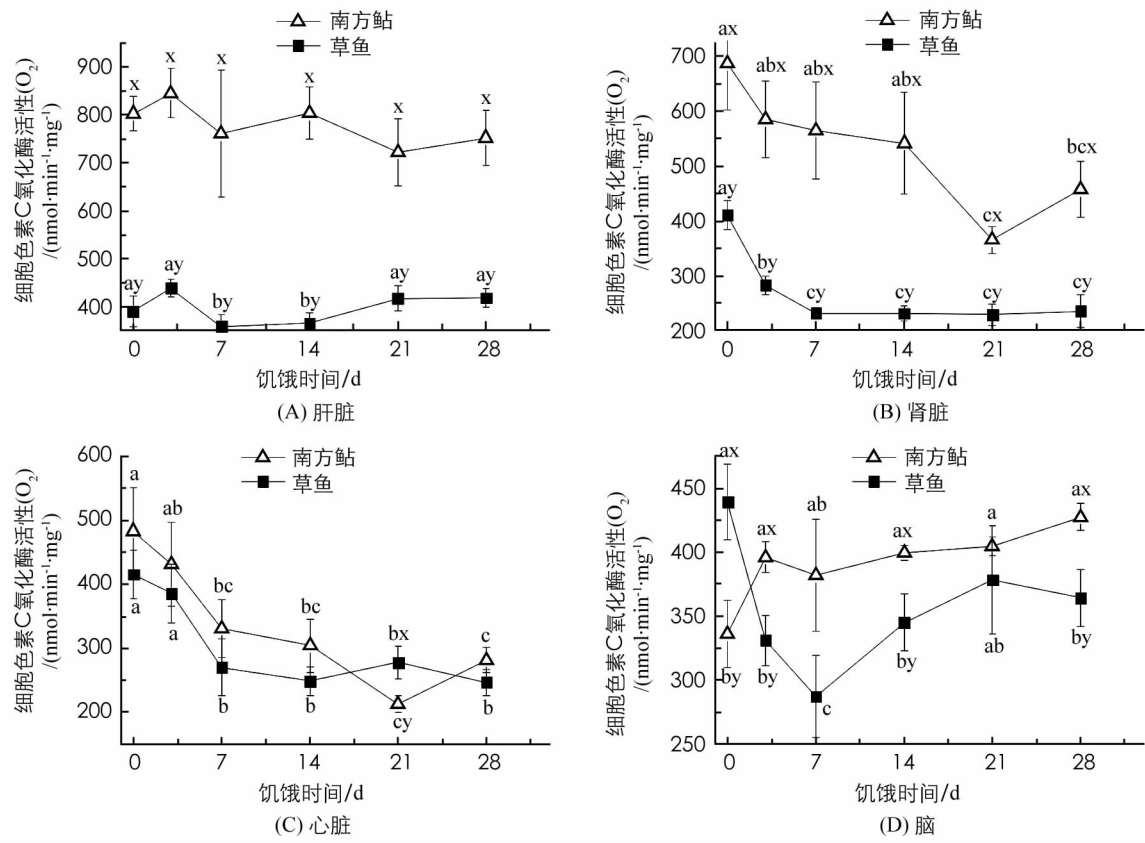


注: A 表示肝脏, B 表示肾脏, C 表示心脏, D 表示脑; 数据用(平均值 $\pm$ 标准误)表示($Mean \pm SE$ 表示, $n=10$); a, b, c: 数据中带有不同上标字母表示饥饿影响鱼体种内 4 种组织线粒体状态 3 呼吸率的差异有统计学意义($p < 0.05$). x, y: 数据中带有不同上标字母表示鱼体种间 4 种组织线粒体状态 3 呼吸率的差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 2 饥饿对南方鲇和草鱼肝、肾、心和脑的线粒体状态 3 呼吸率的影响

2.5 饥饿时间对不同组织线粒体细胞色素 C 氧化酶(CCO)的影响

南方鲇和草鱼的肝脏、肾脏、心脏和脑 4 种组织的线粒体 CCO 活性随饥饿时间进程的变化趋势与各自状态 3 呼吸率变化趋势大致相似(图 3). 南方鲇肝脏和肾脏线粒体 CCO 活性在所有饥饿时间点的取样检测水平都显著高于草鱼($p < 0.05$, 图 3A, 图 3B). 南方鲇和草鱼心脏线粒体 CCO 活性均随饥饿时间的延长呈下降趋势, 2 种鱼的心脏 CCO 活性均在饥饿时间 7 天后显著高于饥饿前的水平($p < 0.05$, 图 3C). 南方鲇脑中线粒体 CCO 活性随饥饿时间延长有上升的趋势, 草鱼的该指标有先下降再上升的趋势; 草鱼的该值在饥饿前显著高于南方鲇, 而在饥饿 3 天、14 天和 28 天时, 则显著低于南方鲇($p < 0.05$, 图 3D).



注: A 表示肝脏, B 表示肾脏, C 表示心脏, D 表示脑; 数据用(平均值±标准误差)表示($Mean \pm SE$ 表示, $n=10$); a, b, c: 数据中带有不同上标字母表示饥饿影响鱼种间 4 种组织中细胞色素 C 氧化酶活性的差异有统计学意义($p < 0.05$). x, y: 数据中带有不同上标字母表示鱼体种间 4 种组织中细胞色素 C 氧化酶活性的差异有统计学意义($p < 0.05$).

图 3 饥饿对南方鲈和草鱼肝、肾、心和脑的细胞色素 C 氧化酶活性的影响

3 讨 论

3.1 饥饿对 2 种鱼体静止代谢和特定体质量生长率影响的比较

有研究报道^[16-18]各种鱼类在饥饿后的静止代谢水平有较大幅度的下降. 本研究发现, 饥饿胁迫使草鱼的静止代谢率持续下降, 但南方鲈在饥饿 7 天至 14 天静止代谢却有明显的上升(图 1A). 南方鲈是捕猎性肉食动物, 张波等^[17]认为短期饥饿使得南方鲈会保持一定程度的活动水平, 以保证在有可利用的食物时, 产生高效捕食的行为反应, 因此其代谢水平反而有一定程度的上升; 草鱼则随着饥饿时间延长, 其静止代谢水平呈近似直线下降趋势(图 1A). 草鱼是草食性动物, 其摄食行为不需要高强度的能量支撑, 因此采用了通过较大幅度的降低静止代谢来应对饥饿胁迫. 由此可见, 南方鲈与草鱼分别为不同的营养类型, 捕食行为模式各异, 因此在适应饥饿胁迫时, 进化出不同的能量生态对策.

南方鲈和草鱼的特定体质量生长率都随着饥饿时间出现负增长, 说明 2 种鱼都通过升负增长率, 即消耗身体以物质形态所储存的能量, 供应维持生存的能量代谢的需求, 从而来应对饥饿胁迫. 2 种鱼负增长的幅度随着饥饿时间的延长都出现了降低, 表明饥饿过程中鱼体进行了降低能量消耗的调整, 这与随饥饿时间的延长, 其静止代谢水平的降幅在饥饿较长时间之后, 也都趋于降低的现象是一致的(图 1B).

3.2 饥饿引起鱼体的器官指数、体质量和组分的变化

鱼体各个器官其细胞组成不同, 生化功能不同, 面对饥饿胁迫时, 鱼体会对一系列的生理生化的过程进行方式各异、水平不同的调整^[7], 但各个器官的调控模式或幅度却呈现一定的差别^[19]. 肝指数通常作为鱼体内贮能物质累积的重要指标^[1,20], 肝脏作为机体重要的储能器官, 在面临饥饿胁迫时, 分解肝糖原和内脂以供应机体生存所必需的能量^[4,8], 从而造成肝器官指数的大幅下降(表 1). 有研究发现^[1]多种鱼类经过一段时间的饥饿后, 肝指数下降, 肝脏组织变密, 肝脏细胞体积变小和脂质空包数量减少, 这与本研究

得到的结果相似。饥饿前,草鱼的肝胰脏指数显著高于南方鲇,但饥饿 28 天后,二者无明显差别,即草鱼肝胰脏下降幅度大于南方鲇,表明南方鲇肝脏在应对饥饿胁迫时比草鱼肝胰脏的抗逆性更强。研究结果支持关于肉食性鱼类比草食性鱼类更加耐受饥饿的观点^[21]。

本研究发现南方鲇和草鱼在饥饿 28 天之后,心器官指数和脑器官指数的变化均不明显(表 1),由此可以看出在应对饥饿胁迫时,脑和心脏的器官指数均相对比较稳定,二者作为维持生存最重要的器官,其抗逆性相对较高是更有利于适应环境的。这与 Tripathi & Verma 发现相似^[19]。

鱼类在饥饿状态下通过利用自身的贮能物质提供能量以维持生命活动,因此作为身体主要储能物质的碳水化合物、脂肪和蛋白质在饥饿过程中将会被不同程度的消耗^[5, 22]。本研究中,南方鲇和草鱼脂肪含量在饥饿期间的变化程度比其它组分明显。比较 2 种鱼的脂肪含量在饥饿前后的变化情况可以看出(表 2),饥饿 28 天后,南方鲇脂肪含量为饥饿处理前的 32.8%,而草鱼的脂肪含量为 42.7%,表明前者降低的幅度明显大于后者;同时饥饿 28 天后,南方鲇的变化不显著,草鱼蛋白质含量却显著降低,而且前者在饥饿 0 天时显著低于后者,在饥饿 28 天时却显著高于后者($p < 0.05$)(表 2)。这说明在面对饥饿胁迫时南方鲇主要动用脂肪去维持能量供应,而草鱼除了动用脂肪外,还需要利用蛋白质贮备应对饥饿胁迫。Salem 等^[5]指出,蛋白质的周转情况可以反映出鱼体的生长状态,生长状态良好的鱼体其蛋白质消耗低。从能量消耗的效率来说,动用脂肪供能比动用糖原、蛋白质更为高效,对鱼体生理功能的不利影响也相对较小。因此,本研究的 2 种实验鱼体组分在饥饿处理前后变化的比较分析的结果也支持上文所论述的肉食性鱼类比草食性鱼类更为耐受饥饿的观点^[21]。

3.3 饥饿对各组织线粒体的代谢影响

线粒体是细胞产生能量的主要细胞器,其提供身体所需能量的 80%^[23-24]。线粒体主要通过调控氧化磷酸化速率来应对细胞活动对 ATP 需求的变化^[25],环境因素或生理状态都有可能改变线粒体含量和性能以适应变化^[26]。已研究表明^[1, 27-29]饥饿胁迫能使线粒体改变功能参数,但改变的程度在不同物种、器官,以及不同的组织中具有差异性。呼吸状态 3 的速率可以作为线粒体呼吸代谢水平的主要功能指标^[30]。南方鲇肝脏线粒体状态 3 呼吸率随饥饿时间延长而降低,但草鱼却呈上升的趋势($p < 0.05$,图 2A),这体现出 2 种鱼面对饥饿出现了物种特异性。南方鲇脑组织线粒体状态 3 呼吸率在饥饿前显著低于草鱼,但在饥饿 14 天之后却显著高于草鱼($p < 0.05$,图 2D);前者的肾脏线粒体状态 3 呼吸率高于后者,其心脏线粒体状态 3 呼吸率低于后者,也都呈现出种间的差异性。

本研究发现饥饿胁迫时,2 种鱼的 CCO 活性的变化趋势与线粒体状态 3 大体一致。CCO 在线粒体呼吸链中处于关键环节,在 ATP 合成酶的参与下,将二磷酸腺苷(ADP)转化成三磷酸腺苷(ATP)^[31]。CCO 活性的调节可以改变线粒体呼吸代谢水平,进而对整个器官组织的能量代谢的模式和水平发生影响^[32-33]。因此,揭示饥饿胁迫对 CCO 活性的影响效应及作用机制,对于阐明动物在饥饿环境中,细胞、器官乃至个体水平的能量学适应机制都具有重要的意义,值得进行深入探讨。

致谢:承蒙谢小军教授对文稿提出了修改意见,明道富老师对实验给予技术指导,张静静、朱峰磊参与部分实验工作,谨此一并致谢。

参考文献:

- [1] SRIDEE N, BOONANUNTANASARM S. The Effects of Food Deprivation on Hematological Indices and Blood Indicators of Liver Function in *Oxyleotris Marmorata* [J]. International Science Index, Nutrition and Food Engineering, 2012, 6(5): 269-273.
- [2] YENGKOKPAM S, Debnath D, Pal A K, et al. Short-term Periodic Feed Deprivation in *Labeo Rohita* Fingerlings: Effect on the Activities of Digestive, Metabolic and Anti-oxidative Enzymes [J]. Aquaculture, 2013, s412-413(6): 186-192.
- [3] MILLAN D N, HOULIHAN D F. Protein Synthesis in Trout Liver is Stimulated by Both Feeding and Fasting [J]. Fish Physiology and Biochemistry 1992, 10 (1) : 23-34.
- [4] MORALES A E, PÉREZ-JIMÉNEZ A, HIDALGO M C, et al. Oxidative Stress and Antioxidant Defenses after Prolonged Starvation in *Dentex Dentex* Liver [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part C Toxicology & Pharmacol-

- ogy, 2004, 139(3): 153—161.
- [5] SALEM M, SILVERSTEIN J, REXROAD C E, et al. Effect of Starvation on Global Gene Expression and Proteolysis in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) [J]. BMC Genomics, 2007, 8(1): 328—328.
- [6] MARTIN S A M, DOUGLAS A, Houlihan D F, et al. Starvation Alters the Liver Transcriptome of the Innate Immune Response in Atlantic Salmon (*Salmo salar*) [J]. BMC Genomics, 2010, 11(1): 418.
- [7] CARUSO G, DENARO M G, CARUSO R, et al. Short Fasting and Refeeding in Red Porgy (*Pagrus Pagrus*, Linnaeus 1758): Response of Some Haematological, Biochemical and Non Specific Immune Parameters [J]. Marine Environmental Research, 2012, 81(3): 18—25.
- [8] MOHAPATRA S, CHAKRABORTY T, SHIMIZU S, et al. Starvation Beneficially Influences the Liver Physiology and Nutrient Metabolism in Edwardsiella Tarda Infected Red Sea Bream (*Pagrus major*) [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A, 2015, 189: 1—10.
- [9] XIE X, SUN R. The Bioenergetics of the Southern Catfish (*Silurus Meridionalis* Chen). I. Resting Metabolic Rate as a Function of Body Weight and Temperature [J]. Physiological Zoology, 1990, 63(6): 1181—1195.
- [10] YAN Y, XIE X. Metabolic Compensations in Mitochondria Isolated from the Heart, Liver, Kidney, Brain and White Muscle in the Southern Catfish (*Silurus meridionalis*) by Seasonal Acclimation [J]. Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology, 2015, 183: 64—71.
- [11] 李万军, 刘立, 闫玉莲, 等. 水体锌暴露对南方鲇 *Silurus meridionalis* 幼鱼的生态毒理学影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(5): 1—9.
- [12] FU S J, ZENG L Q, LI X M, et al. The Behavioural, Digestive and Metabolic Characteristics of Fishes with Different Foraging Strategies [J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(14): 2296.
- [13] TIAN X L, FANG J H, DONG S L. Effects of Starvation and Recovery on the Growth, Metabolism and Energy Budget of Juvenile Tongue Sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. Aquaculture, 2010, 310(1—2): 122—129.
- [14] SILVA-MARRRERO J I, SÁEZ A, CABALLEROSOLARES A, et al. A Transcriptomic Approach to Study the Effect of Long-term Starvation and Diet Composition on the Expression of Mitochondrial Oxidative Phosphorylation Genes in Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*) [J]. BMC Genomics, 2017, 18(1): 768.
- [15] BRADFORD M M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-dye Binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(s1—2): 248—254.
- [16] PREEZ H H D, MCLACHLAN A, MARAIS J F K. Oxygen Consumption of a Shallow Water Teleost, the Spotted Grunter, *Pomadasys Commersonni* (Lacépède, 1802) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology, 1986, 84(1): 61—70.
- [17] 张波, 谢小军. 南方鲇的饥饿代谢研究 [J]. 海洋与湖沼, 2000(5): 480—484.
- [18] CAI L, FANG M, JOHNSON D, et al. Interrelationships Between Feeding, Food Deprivation and Swimming Performance in Juvenile Grass Carp [J]. Aquatic Biology, 2014, 20(1): 69—76.
- [19] TRIPATHI G, VERMA P. Starvation-induced Impairment of Metabolism in a Freshwater Catfish [J]. Zeitschrift Fur Naturforschung C A Journal of Biosciences, 2003, 58(6): 446—451.
- [20] CHELLAPPA S, HUNTINGFORD F A, STRANG R H C, et al. Condition Factor and Hepatosomatic Index as Estimates of Energy Status in Male Three-spined Stickleback [J]. Journal of Fish Biology, 1995, 47(5): 775—787.
- [21] DAY R D, TIBBETTS I R, SECOR S M. Physiological Responses to Short-term Fasting Among Herbivorous, Omnivorous, and Carnivorous Fishes [J]. Journal of Comparative Physiology B-biochemical Systemic & Environmental Physiology, 2014, 184(4): 497—512.
- [22] 张波, 孙耀. 饥饿对真鲷生长及生化组成的影响 [J]. 水产学报, 2000, 24(3): 206—210.
- [23] GUDERLEY H, ST-PIERRE J S. Going with the Flow or Life in the Fast Lane: Contrasting Mitochondrial Responses to Thermal Change [Review] [J]. The Journal of Experimental Biology, 2002, 205(15): 2237—2249.
- [24] MOYES C D, HOOD D A. Origins and Consequences of Mitochondrial Variation in Vertebrate Muscle [J]. Annual Review of Physiology, 2003, 65(0): 177—201.
- [25] LEARY S C, MOYES C D, BATTERSBY B J et al. Inter-tissue Differences in Mitochondrial Enzyme Activity, RNA and DNA in Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. The Journal of Experimental Biology, 1998, 201(24): 3377—3384.
- [26] Guderley H. Metabolic Responses to Low Temperature in Fish muscle [J]. Biological Reviews, 2004, 79(2): 409—427.
- [27] GOLD A J, COSTELLO L C. Effects of Semistarvation on Rat Liver, Kidney, and Heart Mitochondrial Function [J]. Journal of Nutrition, 1975, 105(2): 208—14.

- [28] JUNG K, HENKE W. Effect of Starvation on Antioxidant Enzymes and Respiratory Mitochondrial Functions in Kidney and Liver from Rats [J]. J. Clin. Biochem. Nutr, 1997, 22(3): 163—169.
- [29] MONTERINER P A, TEULIER L, DRAI J, et al. Mitochondrial Oxidative Phosphorylation Efficiency is Upregulated during Fasting in Two Major Oxidative Tissues of Ducklings [J]. Comp Biochem Physiology A Mol Integr Physio, 2017, 212: 1—8.
- [30] BENARD G, FAUSTIN B, PASSERIEUS E, et al. Physiological Diversity of Mitochondrial Oxidative Phosphorylation [J]. American Journal of Physiology-Cell Physiology, 2006, 291(6): C1172—C1182.
- [31] BATTERSBY B J, MOYES C D. [J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 1998, 275(3): R905—R912.
- [32] FONTANESI F, SOTO I C, HORN D, et al. Assembly of Mitochondrial Cytochrome C-oxidase, a Complicated and Highly Regulated Cellular Process [J]. American Journal of Physiology-cell Physiology, 2006, 291(6): 1129—1147.
- [33] WILSON D F, HARRISON D K, VINOGRADOV A D, et al. Mitochondrial Cytochrome C Oxidase and Control of Energy Metabolism: Measurements in Suspensions of Isolated Mitochondria [J]. Journal of Applied Physiology, 2014, 117(12): 1424—1430.

On Effects of Starvation on Growth Performance and Energetic Metabolism in *Silurus Meridionalis* and *Ctenopharyngodon Idellus*

XIA Yuan-xiang, QIU Han-xun, YAN Yu-lian

Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Institute of Hydrobiology and Water Environment,
School of Life Sciences, Southwest University of Education Ministry, Chongqing 400715, China

Abstract: The growth performance and energy metabolism of the juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) and juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) in six different groups which were deprived of feed for 0, 3, 7, 14, 21, 28 days were observed at $27.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$, respectively. As expected, starvation resulted in cessation of growth and there was no significant difference in body weight and body length of the starved fish for 28 days compared to their initial condition for both species. However, condition factor and hepatosomatic index (HSI) of two species were found to be significantly lower after a 28-day period of food deprivation ($p < 0.05$). The Protein content of southern catfish decreased much less than that of grass carp in response to starvation. Opposite trend was observed for the change of lipid content. The resting metabolic rates (RMR) of grass carp were significantly higher than that of southern catfish in each starvation period ($p < 0.05$), and its RMR decreased with the increasing starvation time. RMR of southern catfish increased at initial starvation for 7 days, and then decreased until the end of starvation for 28 days. The specific weight growth rates (SGR) of the two species presented negative during deprivation. During each deprivation period the differences between SGRs of the two species were insignificant. State 3 respiration rates and activity of cytochrome C oxidase of mitochondria in southern catfish and grass carp have different changes with increasing starvation period. The results indicated that the ecophysiological mechanisms in response to starvation for southern catfish and grass carp should be tissue-specific and species-specific, it is concluded that southern catfish and grass carp with different feeding habits and different patterns in predatory behavior, so they have evolved the different ecological strategies in energy metabolism to adapt starvation stress. The results of this study support the view that the carnivorous fish is more tolerant to starvation than herbivorous fish.

Key words: *Silurus meridionalis*; *Ctenopharyngodon idellus*; starvation; growth performance; resting metabolism; mitochondrial metabolism; energetic ecological strategy

责任编辑 胡 杨