

饥饿胁迫对南方鲇幼鱼糖代谢的影响^{*}

范国燕, 李英文

(重庆师范大学 生命科学学院 重庆市动物生物学重点实验室 重庆市生物活性物质工程研究中心, 重庆 400047)

摘要 在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下,以饥饿 0 周作为对照,分别测定了饥饿处理 0、1、2、4 和 8 周后南方鲇(*Silurus meridonalis*)幼鱼的肝指数、糖原含量、血糖浓度及己糖激酶(HK)、葡萄糖激酶(GK)酶活性。结果显示,实验鱼随饥饿时间的延长,肝指数、糖原含量均呈明显下降趋势;饥饿 1 周后的肝指数为 (2.44 ± 0.36) ,肝糖原含量为 $(35.20 \pm 2.25) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,肌糖原含量为 $(30.69 \pm 10.24) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均开始显著低于对照($p < 0.05$)。其中肝指数与肝糖原变化趋势相似。血糖浓度至饥饿 4 周时开始显著低于初始水平($p < 0.05$),表现出较好的稳定性。己糖激酶(HK)、葡萄糖激酶(GK)活性均在饥饿 4 周后开始显著低于初始水平($p < 0.05$),两者表现出相似的变化趋势。研究推测,南方鲇幼鱼应对饥饿胁迫时,优先动用肝脏内的储存物质肝糖原来提供能量。肝糖原含量与维持血糖的稳定有直接关系。饥饿可降低 HK、GK 活性,但短暂饥饿 2 周对两者活性无显著影响。

关键词 南方鲇 饥饿 糖代谢

中图分类号 Q955

文献标识码 A

文章编号 1672-6693(2011)03-0022-06

季节更替、环境巨变、自然界中的食物分布在时间上的不均匀性等原因使鱼类在生活周期的一定阶段面临食物资源的缺乏,由此产生的食物有效性的大幅度变化,会使鱼类在个体发育过程中面临不同程度的饥饿胁迫^[1-2]。此外,不同种类或不同生活周期的鱼对饥饿的适应方式及耐受能力也不同。由于饥饿可以影响鱼类代谢、行为、组织结构、酶活性、生长和机体组成成分等方面,故而相关研究受到国内外学者的高度重视^[3]。近年来,国内外学者对鱼类饥饿做了大量研究,多关注于饥饿对鱼体生化组成、生理生化指标、糖代谢和行为的影响等方面以及再投喂后的补偿性生长情况。国内这方面的工作主要集中在对花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[4],红鲫(*Carrassius auratus*)^[5],红鳍笛鲷(*Lutjanus erythropterus*)^[6],草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[7],南方鲇(*Silurus meridonalis*)^[8-10],吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[3]等鱼类的研究上。

鱼类对饲料的糖代谢与陆上动物并无二致,但与陆上动物相比,鱼类的糖代谢表现为对糖的利用能力极低,特别是肉食性鱼类^[11-12],可以说鱼类具有天生的“糖尿病”。因此,鱼类糖代谢的特殊机制成为了相关研究者所关心的一个热点问题。国内外

学者对此进行了较多的研究,主要集中在饲料碳水化合物含量水平对鱼类餐后糖代谢的影响等方面。国内有关研究已经在南方鲇^[13-14],翘嘴红鲌(*Erythrocyttus ilishae formis*)^[15],青鱼(*Mylopharyngodon pices*)和鲫(*Carrassius auratus*)^[16]等鱼类上有所报道。

南方鲇属鲇形目(Siluriformes),鲇科(Siluridae),鲇属(*Silurus*),为典型的专性肉食性鱼类,属我国特有的重要经济鱼类,广泛分布于长江流域及其以南地区。近年来国内学者对南方鲇的研究不少,但大多围绕在饥饿胁迫和饲料中碳水化合物水平对其生理生态指标的影响等方面,饥饿对南方鲇糖代谢的研究还尚未见报导。本研究通过对南方鲇幼鱼长达 8 周时间的饥饿处理,对其身体指标和主要糖代谢指标做了分析,初步探究饥饿胁迫下南方鲇幼鱼生理指标的变化和糖代谢情况,旨在探讨该鱼种在应对饥饿胁迫时的生态对策,同时为渔业资源管理及水产养殖等方面的实践提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 实验鱼来源及驯化

南方鲇幼鱼购自重庆市合川区水产学校渔场。

* 收稿日期 2011-03-02 修回日期 2011-04-18 网络出版时间 2011-05-16 10:13:00

资助项目 重庆市动物生物学重点实验室科研项目(2009)

作者简介 范国燕,女,硕士研究生,研究方向为鱼类营养学 通讯作者 李英文,E-mail liyingwen@live.cn

鱼体放养于容积为 250 L 的自循环控温水槽中,驯化 30 d,使其充分适应实验室环境。每天投喂切碎的鲢鱼鱼肉,饱足喂食 1 次;充氧泵 24 h 不间断充氧;平均水温控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$;自循环水体,每天更换 1/3 体积水体,水源为充分曝气后的自来水;光照周期为 12 h 光照:12 h 黑暗。实验前,从中挑取身体健康、体色正常、初始体重在 10 ~ 15 g 之间的幼鱼作为实验用鱼。

1.2 实验设计

将经过 30 d 驯化后的南方鲇幼鱼禁食 2 d 后解剖取样,记做第 0 周,作为饥饿前对照。之后分别在饥饿的第 1、2、4、8 周结束时解剖取样。每个实验点从水槽中随机取 9 条鱼,获取血液、肝脏、肌肉等样品,待测血液葡萄糖及糖原含量;另从水槽中随机取 9 条鱼,取出肝脏,待测肝脏内 HK、GK 活性。

1.3 样品制备和测定

用 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 丁香酚对实验鱼进行麻醉,待鱼体身体开始发生侧翻后立刻取出,用毛巾擦干水分,称重、测体长;然后立即断尾取血约 0.1 mL,置于肝素钠处理过的离心管中,以 $12\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 3 min 取上清液,即为血清,置于 -80°C 条件下保存,待测血糖浓度;此后,立即解剖取出肝脏和约 1 g 背部肌肉样品,称重,液氮速冻,分别置于离心管中, -80°C 保存,待测糖原含量等指标。

用于测定肝脏内 HK、GK 活性的肝脏样品需在解冻后,加 10 倍体积 4°C 缓冲液,玻璃匀浆器冰浴匀浆,制成 10% 匀浆液。缓冲液成份参照文献[16]配制。匀浆液在 4°C 、 $4\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 30 min,取上清液;再在 4°C 、 $15\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,离心 30 min,取上清液,立即用于上述酶活性的测定。

血糖的测定采用邻甲苯胺法^[17],糖原的测定采用蒽酮显色法^[18]。HK 和 GK 活性测定参照文献[16,19-21]的方法,设置的反应体系为 $65\text{ mU} \cdot \text{mL}^{-1}$ G6PDH, $2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NADP⁺, $7\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ATP, $80\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris, $5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA, $8\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgSO₄, $1\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KH₂PO₄, $2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO₃, $0.2\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTT, $100\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖, pH 值为 8.2。上述测定结果以 HK 和葡萄糖脱氢酶(GDH)校正后的值为 GK 活性值。上法中葡萄糖水平改为 $0.5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时所测值为 HK 活性值。各试管中分别加入 1 mL 反应液,在 25°C 恒温水浴中保温 3 min 以上,待温度稳定后分别加入 40 μL 酶液,空白管不加酶液,迅速混匀并准确计时后,立即在 25°C 用酶标仪

(SPECTRA MAX 190, Molecular Devices) 在 340 nm 波长下完成测定。上述酶活性的单位定义和计算公式参见文献[20],酶活性单位为 $\text{mU} \cdot \text{mg}^{-1}$,其中 mg 为样品蛋白质的质量单位。

此外,肝指数和肥满度的计算方法参见文献[22]。

1.4 数据的统计分析

在 Excel2003 中对原始数据进行整理,运用 SPSS 17.0 软件对每组数据进行方差分析,并将数据进行多重比较。每组数据均采用平均值 $\pm$ 标准误 (Mean $\pm$ SE) 表示,显著性水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果

2.1 对身体指标的影响

本实验中,饥饿处理对南方鲇幼鱼肥满度的影响较为明显(表 1)。饥饿状态下,随饥饿时间的延长,肥满度呈明显下降趋势。与饥饿 0 周相比,饥饿 1 周后肥满度下降了 6.90% 达显著性水平 ($p < 0.05$);饥饿 2 周后与饥饿 0 周时的肥满度保持相似水平;饥饿 4、8 周后肥满度基本维持在同一水平,但与饥饿 0 周相比分别下降了 12.64% 和 16.10%,均显著低于饥饿 0 周时 ($p < 0.05$)。此外,南方鲇幼鱼体重和体长受饥饿处理的影响不显著。

表 1 饥饿时间对南方鲇幼鱼身体指标的影响

Tab.1 The effect of starvation on body parameters of juvenile *Silurus meridionalis*

	饥饿时间/周				
	0	1	2	4	8
体重/g	11.57 $\pm$ 0.35	12.72 $\pm$ 0.86	11.83 $\pm$ 0.99	12.00 $\pm$ 0.85	9.62 $\pm$ 0.49
体长/cm	11.02 $\pm$ 0.21	11.62 $\pm$ 0.23	11.23 $\pm$ 0.36	11.60 $\pm$ 0.26	10.96 $\pm$ 0.23
肥满度/ (g $\cdot$ cm ⁻³)	0.87 $\pm$ 0.03 ^a	0.81 $\pm$ 0.02 ^{bc}	0.83 $\pm$ 0.03 ^{ab}	0.76 $\pm$ 0.02 ^{cd}	0.73 $\pm$ 0.01 ^d

注:上标不同字母表示不同处理数值间差异显著 ($p < 0.05$),下同。

2.2 对肝指数的影响

图 1 显示,饥饿处理对南方鲇幼鱼肝指数影响显著 ($p < 0.05$)。饥饿状态下,随着饥饿时间的延长,肝指数呈显著下降趋势 ($p < 0.05$)。与饥饿 0 周的肝指数值 3.42 ± 0.36 相比,饥饿 1 周后肝指数为 2.44 ± 0.36 ,下降了 28.65%,显著低于饥饿 0 周 ($p < 0.05$)。饥饿 2 周后肝指数为 1.72 ± 0.22 ,与饥饿 0 周相比下降了 49.71%,达显著水平 ($p < 0.05$);但与饥饿 1 周相比无显著变化。饥饿 4 周和

8 周的肝指数分别为 0.92 ± 0.07 和 0.84 ± 0.01 ,与初始水平相比分别下降了 73.10% 和 75.44%,两者间无显著差异,但均显著低于饥饿 0 周 ($p < 0.05$)。

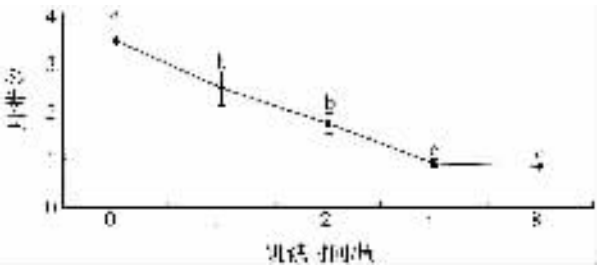


图 1 饥饿时间对南方鲇幼鱼肝指数的影响
Fig. 1 The effect of starvation on hepatosplenic index of juvenile *Silurus meridionalis*

2.3 对血糖浓度的影响

图 2 显示饥饿处理明显地影响了南方鲇幼鱼血糖浓度。饥饿 0 周时,血糖浓度为 $(430.38 \pm 20.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,饥饿 1 周和 2 周后的血糖浓度分别为 $(430.76 \pm 20.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(470.81 \pm 30.27) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,两者均高于初始水平值,但不显著。饥饿 4 周时血糖浓度与饥饿 0 周相比下降了 53.32%,为 $(200.25 \pm 20.077) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达显著水平 ($p < 0.05$)。达显著水平 ($p < 0.05$)。饥饿 8 周后血糖浓度为 $(230.16 \pm 30.00) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显著低于饥饿 0 周时的水平 ($p < 0.05$),降幅为 46.61%。饥饿 8 周血糖浓度较 4 周时有所升高,但两者间无显著差异。

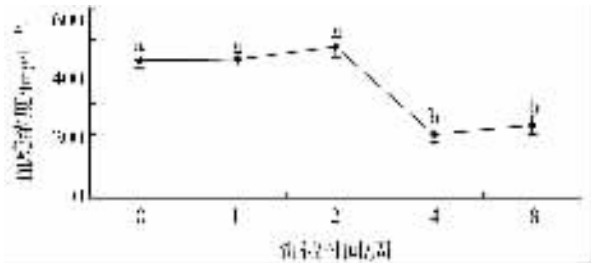


图 2 饥饿时间对南方鲇幼鱼血糖浓度的影响
Fig. 2 The effect of starvation on serum glucose of juvenile *Silurus meridionalis*

2.4 对糖原含量的影响

2.4.1 对肝糖原含量的影响 本实验中,随着饥饿时间的延长,南方鲇幼鱼肝糖原含量明显下降(图 3)。饥饿 0 周时的肝糖原含量为 $(47.54 \pm 2.44) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与之相比的是,饥饿 1 周后肝糖原含量为 $(35.20 \pm 2.25) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,显著低于前者 ($p < 0.05$),下降幅度为 25.96%;饥饿 2 周后肝糖原含量为 $(19.13 \pm 3.98) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比下降了

59.76%,显著低于饥饿 0 周时的水平 ($p < 0.05$)。饥饿 4、8 周后的肝糖原含量分别为 (1.73 ± 1.18) 、 $(4.02 \pm 1.31) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比分别下降了 96.36% 和 91.54%,两者间无显著差异,但均显著低于饥饿 0 周时的水平 ($p < 0.05$)。

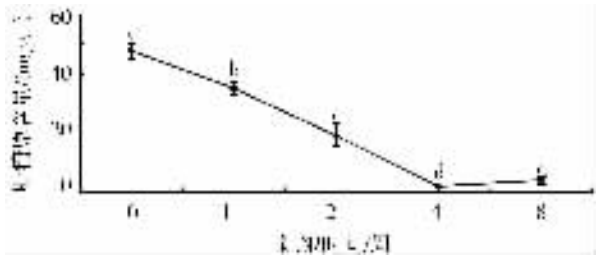


图 3 饥饿时间对南方鲇幼鱼肝糖原含量的影响
Fig. 3 The effect of starvation on liver glycogen of juvenile *Silurus meridionalis*

2.4.2 对肌糖原含量的影响 从图 4 可见,饥饿状态下,南方鲇肌糖原含量呈明显下降趋势。以饥饿 0 周时的 $(110.61 \pm 30.97) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作对照即初始水平,饥饿 1、2、4 和 8 周后的肌糖原含量分别为 (30.69 ± 10.24) 、 (20.25 ± 2.20) 、 (17.10 ± 2.60) 和 $(12.30 \pm 7.90) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与对照相比分别下降了 68.22%、80.62%、85.27% 和 89.41%,4 者均显著低于对照 ($p < 0.05$),4 者间差异不显著。

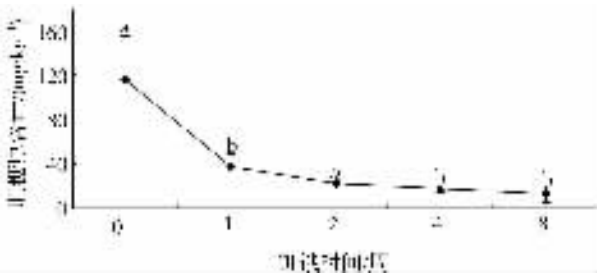


图 4 饥饿时间对南方鲇幼鱼肌糖原含量的影响
Fig. 4 The effect of starvation on muscle glycogen of juvenile *Silurus meridionalis*

2.5 对 HK、GK 活性的影响

结果显示,本实验中,饥饿对南方鲇幼鱼肝脏 HK、GK 的活性影响明显(表 2)。饥饿过程中,HK 活性呈明显下降趋势;饥饿 1、2 周 HK 活性与饥饿 0 周时均未有显著差异;饥饿 4 周时 HK 活性比饥饿 0 周时下降了 41.64%,达显著水平 ($p < 0.05$);饥饿 8 周时 HK 活性达到最低值,与饥饿 0 周时相比下降了 54.10%,达显著水平 ($p < 0.05$),但与饥饿 4 周时相比则无显著差异。同样,饥饿过程中,GK 活性呈显著下降趋势 ($p < 0.05$);饥饿 1、2 周时的 GK 活性与饥饿 0 周时相比差异均不显著;饥饿 4 周时 GK

相比饥饿 0 周时下降了 41.11%,达显著水平($p < 0.05$)。饥饿 8 周时 GK 活性达最低值,显著低于饥饿 0 周时,下降幅度达 53.64%,但与饥饿 4 周时相比差异不显著。此外,在整个饥饿实验过程中,同一实验点上 HK 和 GK 活性均未出现显著差异($p < 0.05$)。

表 2 饥饿时间对南方鲇幼鱼肝脏 HK、GK 活性的影响

Tab.2 The effects of starvation on specific activities of hepatic enzymes of HK and GK of liver of juvenile *Silurus meridionalis* mU · mg⁻¹

	饥饿时间/周				
	0	1	2	4	8
HK	3.29 ± 0.23 ^a	3.66 ± 0.36 ^a	3.30 ± 0.23 ^a	1.92 ± 0.31 ^b	1.51 ± 0.58 ^b
GK	3.43 ± 0.19 ^a	3.85 ± 0.58 ^a	3.57 ± 0.29 ^a	2.02 ± 0.25 ^b	1.59 ± 0.32 ^b

3 讨论

应对饥饿胁迫时,鱼类会动用身体器官中的储能物质如糖类、脂肪和蛋白质,来维持生命活动的正常进行。由于不同鱼类生活方式和身体组成等方面的不同,饥饿状态下消耗身体储能物质和动用身体不同器官储能物质的先后次序也就存在很大不同。鱼类主要的储能场所是肝脏,在饥饿状态下,大多数鱼类首先消耗肝脏内的储存物质。本研究发现,随着饥饿时间延长,肝糖原呈明显下降趋势,南方鲇幼鱼经历饥饿 1 周后,其肝糖原已显著低于饥饿 0 周时的水平,据此可以推测处于早期饥饿的南方鲇幼鱼主要动用糖类物质来提供能量,这与点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*) 幼鱼和鳊鱼(*Parabramis pekinensis*) 幼鱼研究中的结果相似^[22-23]。而在饥饿期间,鲢鳙类优先利用蛋白质作为能源,然后利用脂肪^[24]。河鲈(*Perca fluviatilis*) 幼鱼饥饿后在 20℃ 利用糖原作为能源,15℃ 利用蛋白质作为能源^[25]。翘嘴鲌(*Culter alburnus*) 优先利用脂肪作为能源,当脂肪消耗到一定程度时再利用蛋白质作为能源^[26]。在饥饿过程中,南方鲇幼鱼肝指数也迅速下降,由此可以说明在饥饿过程中南方鲇幼鱼优先动用肝脏内的储能物质来提供能量。饥饿条件下南方鲇幼鱼肝糖原和肝指数的变化趋势相似,表明其肝指数的变化主要是由肝糖引起的,与鳊鱼幼鱼研究中的结果相似^[23]。

血糖和肝糖原水平是反映动物糖代谢和全身组织细胞功能状态以及内分泌机能的一个重要指标,同时也可以反映饵料和营养是否适当、肝脏机能是否良好^[27]。血糖来自食物中消化吸收后的葡萄糖

及肝糖原的分解和异生作用。肌肉和肝脏以糖原形式储存糖,血液中则以葡萄糖形式存在,两者之间在通常情况下保持动态平衡状态^[28]。大多数鱼中,肝糖原通常首先被分解为葡萄糖用来提供能量,同时也用来维持血糖浓度^[29]。本研究结果显示,实验鱼在饥饿过程中,直到饥饿 2 周时血糖浓度较初始水平仍没有出现显著性差异。饥饿 4 周时开始显著低于饥饿 0 周时的水平,但与饥饿 8 周时相比无显著变化,整个饥饿过程中血糖表现出较好的稳定性。而在饥饿过程中,南方鲇幼鱼肝糖原和肌糖原的下降均快于血糖浓度。肌糖原自饥饿 1 周开始已显著低于初始水平,饥饿 1 周到 8 周的肌糖原含量一直维持在同一水平上,未出现显著性变化。这点可能是由于肌肉中缺乏葡萄糖-6-磷酸酶,肌糖原不能分解为血糖^[30]。因此,这进而验证了肝糖原的分解与维持血糖浓度、保证内环境的稳定直接相关。

与哺乳动物相比,鱼类特别是肉食性鱼类对糖的利用极低^[31]。在糖代谢过程中,鱼类的糖代谢酶起了重要的作用。目前关于鱼类糖代谢酶的研究已经较多,大多数酶类都有所涉及,但是关于各种酶的动力学特性的研究还极为有限,相关研究表明,鱼体内酶的特性与鱼的进化发育结果一致,同时还会受到各种因素的影响^[32]。糖酵解和糖异生是鱼体内糖代谢的主要途径。糖酵解的第一步是葡萄糖磷酸化生成 6-磷酸葡萄糖,催化这个反应的酶有 HK 和 GK。HK 和 GK 活性对维持动物体血糖动态平衡,增加对糖的利用有重要意义^[33-34]。人类和动物体以及离体肝细胞的研究中发现,GK 对葡萄糖的利用和糖原合成有重要作用^[35]。同时,GK 在鱼类保持葡萄糖的动态平衡方面也有非常重要的作用^[36]。在哺乳动物体内,HK 和 GK 是肝脏中调节血糖浓度的关键酶,而鱼类对糖的利用能力较低的原因可能与缺乏 HK 以及 GK 活性较低有关^[37]。研究表明,鱼类 HK 的活性是比较低的,尤其是肝脏中的 HK 活性要比鼠类低 10 倍左右^[38]。本研究中,南方鲇幼鱼肝脏内 HK 和 GK 活性在初始值分别为(3.29 ± 0.23) mU · mg⁻¹、(3.43 ± 0.19) mU · mg⁻¹,属于相对较低水平。由此推测,作为典型的专性肉食性鱼类,南方鲇对糖利用较低的原因可能是由于体内 HK 和 GK 活性较低。本实验中实验鱼在饥饿过程中,随饥饿时间的延长,其肝脏 HK 和 GK 活性均呈显著下降趋势,且两者保持相似的变化趋势。由此可知,饥饿可能抑制这两种酶的活性。这点与虹鳉(*Oncorhynchus mykiss*) 和乌鲤鱼(*Sparus aurata*) 中的研究结果类

似,禁食使虹鳟肝脏内 HK 和 GK 活性均下降,而饥饿和能量限制可显著影响虹鳟和乌颊鱼肝脏内 GK 的 mRNA 水平和 GK 活性^[39-42]。此外,本实验中,实验鱼 HK 和 GK 活性均从饥饿 4 周起才开始出现显著下降,这说明短期饥饿(4 周以内)对 HK 和 GK 活性影响并不明显。在欧洲海鲈(*Dicentrarchus labrax*)的研究中也有相似的发现,9 d 短暂饥饿对欧洲海鲈肝脏内 GK 酶活性无显著影响^[29]。

参考文献:

- [1] Cavalli L, Chappaz R, Bouchard P, et al. Food availability and growth of the brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill), in a French alpine lake. [J]. Fisheries Manage and Ecology, 1994, 4: 167-177.
- [2] Chappaz R, Olivart G, Brun G, et al. Food availability and growth rate in natural populations of the brown trout (*Salmo trutta*) in corsican streams [J]. Hydrobiology, 1996, 331: 63-69.
- [3] 刘波, 何庆国, 唐永凯, 等. 饥饿胁迫对吉富罗非鱼生长及生理生化指标的影响 [J]. 中国水产科学, 2009, 16 (2): 230-237.
- [4] 曾庆民. 饥饿对花鲈生长效果的比较研究 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2004, 9 (2): 122-126.
- [5] 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]. 水生态学杂志, 2009, 2 (5): 80-84.
- [6] 王沛宾, 林学群. 饥饿和恢复投喂对红鳍笛鲷生化组成的影响 [J]. 水产科学, 2005, 24 (12): 10-13.
- [7] 叶元土, 蔡春芳, 王永玲, 等. 禁食对草鱼不同组织、器官蛋白质代谢的影响 [J]. 动物学杂志, 2006, 41 (3): 13-20.
- [8] 邓利, 张波, 谢小军. 南方鲇继饥饿后的恢复生长 [J]. 水生生物学报, 1999, 23 (2): 167-173.
- [9] 宋昭彬, 何学福. 饥饿状态下南方鲇幼鱼仔鱼的形态和行为变化 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1998, 23 (4): 462-466.
- [10] 付世建, 邓利, 张文兵, 等. 南方鲇幼鱼胃和肝脏的组织结构及其在饥饿过程中的变化 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1999, 24 (3): 336-342.
- [11] Shiau S Y. Utilization of carbohydrates in warm-water fish with particular reference to tilapia, *Oreochromis niloticus* x o. aureus [J]. Aquaculture, 1997, 151: 79-96.
- [12] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrates by fish [J]. Aquaculture, 1994, 124: 67-80.
- [13] 林小植, 罗毅平, 谢小军. 饲料碳水化合物水平对南方鲇幼鱼餐后糖酵解酶活性及血糖浓度的影响 [J]. 水生生物学报, 2006, 30 (3): 304-310.
- [14] 付世建, 罗毅平, 谢小军. 南方鲇摄食碳水化合物后的血糖动力学方程 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2006, 31 (4): 167-173.
- [15] 戈贤平, 刘波, 谢骏, 等. 饲料中不同碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长及血液学指标和糖代谢酶的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2007, 30 (3): 88-93.
- [16] 蔡春芳. 青鱼和鲫对饲料糖的利用及其代谢机制的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2004: 70-87.
- [17] 张喜南. 动物生物化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 253-254.
- [18] 黄如彬, 丁昌玉, 林原怡. 生物化学实验 [M]. 北京: 世界图书出版社, 1995: 109-110.
- [19] Tranulis M A, Dregni O, Christophersen B, et al. A glucokinase-like enzyme in the liver of atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Comp Biochem Physiol, 1996, 114B: 35-39.
- [20] 蒋传葵, 金承德, 吴仁龙, 等. 工具酶的活力测定 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1982: 43-45.
- [21] 高学军, 李庆章. 猪粪尾蚴体内发育过程中能量代谢变化规律的研究 [J]. 东北农业大学学报: 自然科学版, 2004, 35 (3): 334-337.
- [22] 范国燕, 赵春彦, 李英文. 饥饿与再投喂对鳊鱼幼鱼糖代谢的影响 [J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2010, 27 (5): 19-22.
- [23] 柳敏海, 彭志兰, 施兆鸿, 等. 饥饿和再投喂对点带石斑鱼幼鱼生长生化组成和行为的影响 [J]. 海洋渔业, 2009, 31 (2): 146-153.
- [24] Weatherley H A, Gill H S. Recovery growth following periods of restricted rations and starvation in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) [J]. J Fish Biol, 1981, 18 (2): 195-208.
- [25] Mehner T, Wieser W. Energetics and metabolic correlates of starvation in juvenile perch (*Perca fluviatilis*) [J]. J Fish Biol, 1994, 45 (2): 325-333.
- [26] 程鹏, 樊启学, 张磊, 等. 饥饿和恢复投喂对翘嘴鲌幼鱼摄食生长及体成分的影响 [J]. 淡水渔业, 2009, 39 (1): 30-35.
- [27] 赵万鹏, 刘永坚, 潘庆, 等. 草鱼摄食后血糖和肝糖原质量分数的变化 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41 (3): 64-67.
- [28] 林浩然. 鱼类生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 86.
- [29] Perez-Jimenez A, Guedes M J, Morales A E, et al. Metabolic responses to short starvation and refeeding in *Dicentrarchus labrax*. Effect of dietary composition [J]. Aquaculture, 2007, 265: 325-335.
- [30] 祝尧荣, 沈文英. 饥饿和再投喂对草鱼鱼种糖代谢的影响 [J]. 绍兴文理学院学报, 2002, 22 (4): 23-25.
- [31] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish [J]. Aquaculture, 1994, 124: 67-80.
- [32] 王广宇, 刘波, 谢骏, 等. 鱼类糖代谢几种关键酶的研究进展 [J]. 上海水产大学学报, 2008, 17 (3): 377-383.
- [33] Panserat S, Capill E, Gutierrez J, et al. Glucokinase is

- highly induced and glucose-6-phosphatase poorly repressed in liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by a single meal with glucose [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B, 2001, 128: 275-283.
- [34] Werve V D, Lange G, Newgard A, et al. New lessons in the regulation of glucose metabolism taught by the glucose-6-phosphatase system [J]. European Journal of Biochemistry, 2000, 267: 1533-1549.
- [35] Postic C, Shiota M, Magnuson M M. Cell-specific roles of glucokinase in glucose homeostasis [J]. Recent Prog Horm Res, 2001, 56: 195-217.
- [36] Blin C, Panserat S, Medale F, et al. Teleost liver hexokinase and glucokinase-like enzymes: partial cDNA cloning and phylogenetic studies in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), common carp (*Cyprinus carpio*) and gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1999, 21: 93-102.
- [37] 谭肖英, 罗智, 刘永坚. 鱼类对饲料中糖的利用研究进展 [J]. 中国饲料, 2007 (6): 19-23.
- [38] Tranulis M A, Christophersen B, Blom A K, et al. Glucose dehydrogenase, glucose-6-phosphate dehydrogenase and hexokinase in liver of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Effects of starvation and temperature variations [J]. Comp Biochem Physiol, 1991, 99B: 687-691.
- [39] Soengas J L, Polakof S, Chen X, et al. Glucokinase and hexokinase expression and activities in rainbow trout tissues: changes with food deprivation and refeeding [J]. Am J Physiol Regulatory Integrative Comp Physiol, 2006, 291: 810-821.
- [40] Caseras A, Meton I, Fernandez F, et al. Glucokinase gene expression is nutritionally regulated in liver of gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. Biochim Biophys Acta, 2000, 1493: 135-141.
- [41] Meton I, Caseras A, Fernandez F, et al. Molecular cloning of hepatic glucose-6-phosphate catalytic subunit from gilthead seabream (*Sparus aurata*): response of its mRNA levels and glucokinase expression to refeeding and diet composition [J]. Comp Biochem Physiol, 2004, 138B: 145-153.
- [42] Soengas J L, Polakof S, Chen X, et al. Glucokinase and hexokinase expression and activities in rainbow trout tissues: changes with food deprivation and refeeding [J]. Comp Physiol, 2006, 291: 810-821.

Animal Sciences

Effects of Starvation on Metabolism of Glucose in Juvenile *Silurus meridionalis*

FAN Guo-yan, LI Ying-wen

(Engineering Research Center of Bioactive Substances, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology,
College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: To investigate the effects of starvation with different time courses on hepatosomatic index (HSI), glycogen, serum glucose and activities of glycolytic key enzymes (HK, GK) in juvenile *Silurus meridionalis*. The fish were starved for 0, 1, 2, 4, 8 weeks respectively at $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Samples were taken after the process. The starvation for 0 week is set as the control group. The results showed that, as starvation continued, HSI and glycogen decreased significantly. Fasting for 1 week, the HSI was $(2.44 \pm 0.36) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, the liver glycogen was $(35.20 \pm 2.25) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and the muscle glycogen was $(30.69 \pm 10.24) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively; all of the three indices were significantly below original value ($p < 0.05$). During the experiment, HSI took on a similar trend with liver glycogen. Fasting for 4 weeks, serum glucose had begun to significantly below original value ($p < 0.05$), but it had a lesser variation extent. The activities of HK and GK had begun to significantly below original value after fasting for 4 weeks ($p < 0.05$), and the two indices had a similar trend. So, it is suggested that during the starvation, the fish mainly use glucide as energy source, mobilize the substances in liver firstly and the change of liver glycogen has a direct relationship with the stability of serum glucose; and the starvation can restrain the activities of HK and GK, whereas, short-time starvation (two weeks) has a trivial effect.

Key words: *Silurus meridionalis*; starvation; glycogen metabolism

(责任编辑 方兴)