

间歇性禁食对黄鳝生长、消化酶活性及血液生化指标的影响

阮国良^{1,2,3}, 刘家芳¹, 杨代勤^{1,3*}

(1. 长江大学动物科学学院, 长江中游湿地农业教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025;

2. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了研究不同强度的间歇性禁食对黄鳝生长、消化酶活性及血液生化指标的影响。在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水温条件下, 以鲜活水蚯蚓为饵料设定 5 种投喂模式饲养黄鳝: 第一种为连续投喂的对照组; 第二种禁食 1 d 后再投喂 1 d; 第三种禁食 2 d 后再投喂 2 d; 第四种禁食 4 d 后再投喂 4 d; 第五种禁食 8 d 后再投喂 8 d。5 种方式分别以 C、S1F1、S2F2、S4F4 和 S8F8 表示, 实验周期 64 d。结果显示: (1) 与对照组相比, 遭受间歇性禁食的黄鳝的特定生长率 (SGR)、相对增重率及终末体质量均显著性降低, 但其实际摄食率 (FR) 却显著提升, 且 S1F1 组的食物转换效率 (FCE) 显著高于其它各组。因而, 不同强度的间歇性禁食均诱导出部分补偿生长效应, 其中 S1F1 的部分补偿效应最强; (2) S1F1 组胃组织的蛋白酶活性显著高于 S2F2 组, S1F1 组和 S2F2 组胃组织的蛋白酶活性显著高于其它组; 各实验组的胃、前肠、后肠和肝脏等组织的淀粉酶活性均与 C 组无显著差异; S1F1 组肝脏组织和后肠组织的脂肪酶活性均显著高于 C 组、S4F4 组和 S8F8 组; (3) 各实验组血清的总蛋白含量和葡萄糖含量均无显著差异; C 组与 S1F1 组之间的血清总胆固醇含量无显著差异, 但却显著高于 S2F2 组、S4F4 组和 S8F8 组; 在 S2F2 组、S4F4 组和 S8F8 组之间, 其血清胆固醇含量随着间歇性禁食强度的增加而降低。实验结果表明, 黄鳝在遭受间歇性禁食过程中, 可通过相应消化酶活性的提升、食物利用率的改善以及消化生理机能的适应来获得生长补偿, 且相对低强度的间歇性禁食 (S1F1) 可诱导出较强的补偿生长效应。

关键词: 黄鳝; 间歇性禁食; 补偿生长; 消化酶; 血清生化指标

中图分类号: Q 178.1; S 917.4

文献标志码: A

在鱼类养殖中, 降低饲料与劳动成本是一个非常有意义的问题。其中, 利用补偿生长现象建立适宜的投喂模式是解决此问题的重要途径之一^[1]。补偿生长是指在遭受一段时间的禁食、营养不足等胁迫后, 动物在这些胁迫解除之后可通过改善饲料转化效率或提高摄食率, 表现出某个阶段的加速生长现象^[2-3]。间歇性摄食 (循环禁食和再投喂) 可反复激活其生长补偿的能力, 诱导鱼类产生不同程度的补偿生长^[4-6], 且这种补偿生长可以通过改善饲料转化效率或提高摄食率来获得^[1]。在渔业生产中, 饲料转化效率的提高

意味着饲料的节约, 而改变投喂模式, 如进行一定程度的禁食, 则可减少投喂次数、节约劳动成本, 这对手工投喂的养殖鱼类尤其重要。然而, 不同鱼类对禁食的耐受性与适应性不一样, 且其食物利用效率 (摄食率和饲料转换效率) 与生长补偿的程度也因禁食的时间和强度而异^[6-9]。因此, 对特定鱼类而言, 为了获得良好的补偿生长效应, 仍需要摸索出合适的禁食或营养胁迫的模式和强度。

黄鳝 (*Monopterus albus*) 是我国重要的经济鱼类^[10]。黄鳝的养殖在我国长江中下游地区发

收稿日期: 2012-12-16 修回日期: 2013-03-31

资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003076); 湖北省教育厅青年科研项目 (Q20121213)

通信作者: 杨代勤, E-mail: yangdaiq@163.com

展迅速,2009 年和 2010 年黄鳝的全国养殖产量分别为 23.7 万 t 和 27.3 万 t^[11-12]。目前,黄鳝国内外市场需求的继续增长正使得其养殖规模朝着产业化的方向发展^[13]。作为一种肉食性鱼类^[14-15],其对饲料中的蛋白需求量相对较高^[16-17],因而研究黄鳝的补偿生长效应,摸索提高饲料效率,节省饲料用量、降低饲料成本的方法,对提高养殖效益大有益处。但迄今,相关的研究却鲜见报道。实验初步研究了间歇性禁食对黄鳝的生长补偿效应及其生理适应性,旨在为提高黄鳝养殖效益等提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼、饵料及饲养条件

实验用幼鳝(19.5 ± 2.0) g 来自长江大学黄鳝研究所。实验鱼经体质量筛选后转入实验室的塑料水族箱(70 cm × 55 cm × 36 cm)内进行饲养。在正式实验前进行 1 周的饱食投喂适应性暂养。暂养和实验期间的饵料为鲜活的水蚯蚓(干物质含量 21.3%,干物质中粗蛋白含量 46.8%,能量含量 24.0 kJ/g)。实验期间,养殖箱内的溶氧 > 5.2 mg/L,氨氮 < 0.09 mg/L,pH 6.5 ~ 7.2,通过双制式空调将室温控制在(25.0 ± 1.0)℃。

1.2 实验设计及步骤

实验设 1 个对照组和 4 个禁食处理组,每组随机放鱼 20 尾,每组 3 个重复,实验时间为 64 d。实验分组具体如下:对照组(C):连续每日饱食喂食 1 次,每日傍晚时分进行足量投喂并观察黄鳝的摄食情况,从投喂开始至 2 h 后,如水族箱中水蚯蚓略有剩余则视为饱食投喂;禁食 1 d,饱食喂食 1 d 组(S1F1):共 32 个周期;禁食 2 d,饱食喂食 2 d 组(S2F2):共 16 个周期;禁食 4 d,饱食喂食 4 d 组(S4F4):共 8 个周期;禁食 8 d,饱食喂食 8 d 组(S8F8):共 4 个周期。实验期间,饱食投喂于每天下午 17 ~ 18 时进行,残饵于次日上午 9 时左右进行虹吸清理。投喂过程中,对所投喂的水蚯蚓及所收集的残饵进行称重;每次称重前用滤纸覆盖挤压水蚯蚓以吸其水分,并重复称重 3 次。

在实验前和实验结束时,将鱼禁食 24 h 称重以获得每箱鱼的初始和终末体质量。实验结束时,从每箱鱼中随机取样 5 尾,取其肝脏,刮取胃、前肠及后肠的粘膜并冰浴匀浆以制备消化酶粗酶液,用以测定消化酶活性;静脉取血并制备血清,

用以血液生化指标测定。

1.3 消化酶活性及血液生化指标测定

蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶活性的测定分别采用福林-酚试剂法、3,5-二硝基水杨酸(DNS)显色法以及聚乙烯醇橄榄油乳化液水解法,具体操作参照文献[18]进行。蛋白酶活性大小用 1 g 新鲜组织在 35℃、pH 8.5 条件下,1 min 分解酪蛋白产生 1 μg 酪氨酸定为 1 个活性单位来表示[μg/(g·min)];淀粉酶活性大小用 1 g 新鲜组织在 30℃、pH 8.0 条件下,1 min 内使可溶性淀粉分解产生麦芽糖的毫克数来表示[mg/(g·min)];脂肪酶活性大小用 1 g 新鲜组织在 30℃、pH 7.5 条件下,1 min 使脂肪分解产生 1 μg 脂肪酸的量来表示[μg/(g·min)]。血清的蛋白质、葡萄糖及胆固醇的含量测定分别采用考马斯亮蓝染色法、邻甲苯胺法及磷硫铁试剂法^[19]。

1.4 结果计算

相对增重率(WG,%) = 100 × (W_t - W₀)/W₀,式中 W_t 和 W₀ 分别为鱼体的终末及初始体质量;特定湿重生长率(SGR_w,%) = 100 × (LnW_t - LnW₀)/T,T 为实验周期(64 d);平均摄食率(FR_m,%) = 200I_{Td}/T × (W_t + W₀),式中 I_{Td} 为实验期间总摄食量(干重);实际摄食率(FR_a,%) = 200I_{Td}/t × (W_t + W₀),式中 t 为实际投喂天数;食物转换效率(FCE,%) = 100 × (W_t - W₀)/I_{Td}。实验结果用平均数 ± 标准差表示,采用 Statistica 6.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),当处理之间差异显著(P < 0.05)时,用 Duncan 检验进行多重比较。

2 结果

2.1 体质量生长、摄食与食物转换效率

表 1 显示,4 个实验组的末重、相对增重率及 SGR 均显著低于对照组(P < 0.05),且各指标随着禁食间隔时间的延长而显著下降(P < 0.05);S1F1 组的末重显著高于其它的实验组且与对照组相对接近,S4F4 和 S8F8 组之间的相对增重率无显著差异(P > 0.05)。

与对照组相比,S1F1 的平均摄食率(FR)显著下降,但其实际 FR 和食物转换效率(FCE)显著提高(P < 0.05);后 3 个实验组的平均 FR 和实际 FR 与对照组相比总体上显著提升,但它们的 FCE 显著低于对照组且降幅较大(P < 0.05)。

2.2 消化酶活性

由表2、表3和表4可知,对胃组织的蛋白酶活性而言,S1F1组显著高于S2F2组($P < 0.05$),且这2组又均显著高于其它实验组及对照组($P < 0.05$),S4F4和S8F8组与对照组无显著差异($P > 0.05$)。各实验组的前肠、后肠和肝脏组织的蛋白酶活性均与对照组无显著差异;各实验

组的胃、前肠、后肠和肝脏等组织的淀粉酶活性均与对照组无显著差异($P > 0.05$);在胃和前肠,各实验组及对照组之间的脂肪酶活性无显著差异,但在后肠和肝脏,实验组S1F1的脂肪酶活性显著高于其它各组($P < 0.05$),其它各组间无显著差异($P > 0.05$)。

表1 不同投喂方式下黄鳍的相对增重率、特定生长率(SGR)、摄食率(FR)和食物转换效率(FCE)

Tab.1 The relative weight gain, specific growth rate (SGR), feeding rate (FR) and feed conversion efficiency (FCE) of *M. albus* in different feeding regimes

组别 groups	初均重/g initial mean weight	末均重/g final mean weight	相对增重率/% relative weight gain	特定生长率/% specific growth rate	平均摄食率/% average feeding rate	实际摄食率/% actual feeding rate	食物转换效率/% feed conversion efficiency
C	19.63 ± 0.81	49.63 ± 1.68 ^a	153.38 ± 17.15 ^a	1.45 ± 0.11 ^a	1.57 ± 0.07 ^a	1.57 ± 0.07 ^a	86.02 ± 0.17 ^a
S1F1	19.86 ± 0.18	46.08 ± 1.10 ^b	131.98 ± 5.44 ^b	1.32 ± 0.02 ^b	1.37 ± 0.04 ^b	2.73 ± 0.12 ^b	90.91 ± 0.18 ^b
S2F2	19.51 ± 0.75	41.54 ± 0.81 ^c	117.10 ± 9.62 ^{bc}	1.18 ± 0.05 ^c	1.56 ± 0.06 ^a	3.11 ± 0.09 ^c	72.46 ± 0.15 ^c
S4F4	19.14 ± 0.20	41.57 ± 0.76 ^c	113.25 ± 9.57 ^c	1.21 ± 0.09 ^c	1.67 ± 0.11 ^c	3.36 ± 0.08 ^d	72.33 ± 0.18 ^c
S8F8	20.01 ± 0.36	40.39 ± 1.86 ^c	101.80 ± 8.16 ^c	1.10 ± 0.04 ^d	1.66 ± 0.07 ^c	3.33 ± 0.10 ^d	63.29 ± 0.22 ^d

注:同列中数值中无相同字母表示存在显著差异($P < 0.05$);下同。

Notes: Values within the same column that do not have the same letters are significantly different at $P < 0.05$; the same as the following.

表2 不同投喂方式下黄鳍消化器官蛋白酶的活性

Tab.2 The protease activities of digestive organs of *M. albus* in different feeding regimes $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$

组别 groups	胃 stomach	前肠 forgut	后肠 hindgut	肝脏 liver
C	2 266.25 ± 11.42 ^c	1 658.38 ± 9.60	826.06 ± 11.84	573.13 ± 6.90
S1F1	2 528.32 ± 40.53 ^a	1 674.47 ± 13.96	820.62 ± 13.75	563.56 ± 15.44
S2F2	2 316.60 ± 29.09 ^b	1 657.61 ± 9.42	821.10 ± 14.41	571.30 ± 15.84
S4F4	2 253.76 ± 14.50 ^c	1 655.59 ± 13.04	821.33 ± 17.52	557.18 ± 15.07
S8F8	2 265.70 ± 13.27 ^c	1 647.24 ± 25.28	818.75 ± 23.08	548.51 ± 14.56

表3 不同投喂方式下黄鳍消化器官淀粉酶的活性

Tab.3 The amylase activities of digestive organs of *M. albus* in different feeding regimes $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min})$

组别 groups	胃 stomach	前肠 forgut	后肠 hindgut	肝脏 liver
C	1.14 ± 0.23	6.25 ± 1.14	7.92 ± 0.16	5.14 ± 1.99
S1F1	1.20 ± 0.16	6.49 ± 0.68	8.13 ± 0.51	5.35 ± 0.13
S2F2	1.12 ± 0.13	6.25 ± 0.31	7.94 ± 0.14	5.21 ± 0.82
S4F4	1.11 ± 0.14	6.36 ± 0.50	7.85 ± 0.14	5.26 ± 0.51
S8F8	1.13 ± 0.21	6.16 ± 0.81	7.90 ± 0.25	5.49 ± 0.31

表4 不同投喂方式下黄鳍消化器官脂肪酶的活性

Tab.4 The lipase activities of digestive organs of *M. albus* in different feeding regimes $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{min})$

组别 groups	胃 stomach	前肠 forgut	后肠 hindgut	肝脏 liver
C	8.39 ± 1.19	18.26 ± 2.64	28.19 ± 2.47 ^b	25.32 ± 3.33 ^b
S1F1	8.27 ± 0.97	17.99 ± 1.40	32.58 ± 1.72 ^a	30.45 ± 1.69 ^a
S2F2	8.46 ± 1.06	18.15 ± 1.37	27.57 ± 1.85 ^b	25.84 ± 2.53 ^b
S4F4	8.43 ± 0.86	18.34 ± 1.27	28.30 ± 1.82 ^b	24.90 ± 1.30 ^b
S8F8	8.26 ± 1.14	18.19 ± 1.82	27.93 ± 1.51 ^b	24.99 ± 1.37 ^b

2.3 血液生化成分

表 5 显示,各组之间的总蛋白含量或葡萄糖含量无显著差异 ($P > 0.05$);血清胆固醇含量随着禁食间隔时间的增加呈现下降趋势,除 S1F1 组外,其余 3 组均显著低于对照组 ($P < 0.05$)。

表 5 不同投喂方式下黄鳝部分血清生化指标

Tab.5 Some serum biochemical indices of *M. albus* in different feeding regimes g/L

组别 groups	总蛋白 TP	葡萄糖 GLU	总胆固醇 TC
C	40.00 ± 2.78	3.43 ± 0.19	16.23 ± 0.37 ^a
S1F1	39.93 ± 0.51	3.69 ± 0.33	15.53 ± 0.37 ^{ab}
S2F2	39.63 ± 3.80	3.56 ± 0.14	15.38 ± 0.25 ^b
S4F4	38.77 ± 2.06	3.70 ± 0.27	15.13 ± 0.40 ^b
S8F8	39.00 ± 3.42	3.71 ± 0.12	14.36 ± 0.50 ^b

3 讨论

3.1 间歇性禁食条件下的生长补偿效应

在本实验中,虽然对黄鳝进行了不同的禁食处理,但由于黄鳝具有较强的耐饥性,且各重复组中的黄鳝个体大小基本一致,因而实验过程中仅个别重复组黄鳝零星死亡,未出现自相残杀现象。

SGR 是判定鱼类是否获得补偿生长以及补偿程度的重要指标^[2]。SGR 的提高是通过实际 FR 和(或)FCE 的提高来实现的^[1-2,20-22],因而也可考虑通过实际 FR 或 FCE 是否提高来判断动物是否获得补偿生长。在间隔投喂实验中,若处理组实际 FR 或(和)FCE 增加幅度足够大,实验组鱼的 SGR 可赶上或超过持续投喂的对照组鱼,则获得完全补偿或超补偿生长效应;若处理组实际 FR 或(和)FCE 虽有增加但幅度不够大,其 SGR 就可能低于对照组,有研究将此定义为部分补偿生长^[20-22];若处理组鱼的实际 FR 或 FCE 不增加甚或下降,则处理组鱼因其 SGR 过小于对照鱼的 SGR 从而不能发生补偿生长。本实验中,各处理组的 FCE 与(或)FR 提高,均获得了部分补偿生长,这与对银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[4]、长吻鲢 (*Leiocassis longirostris*)^[4]、金头鲷 (*Sparus aurata*)^[1]、白梭吻鲈 (*Sander lucioperca*)^[6]、庸鲈 (*Hippoglossus hippoglossus*)^[20]、罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[21]、异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*)^[22]、杂交条纹鲈 (*Morone spp.*)^[23]、大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)^[24] 等的研究结果类似。

但是,上述鱼类在实验过程中经历了从几天到几周的不等的禁食时间,且禁食和投喂的时间比例及禁食强度也不一致。例如,白梭吻鲈在禁食 3 d(或 6 d)再投喂 1 d 的循环禁食模式下仅获得部分补偿生长,但在禁食 1 d 再投喂 1 d 的模式下获得完全补偿生长^[6];杂交条纹鲈在在禁食 2 周再投喂 2 周或禁食 4 周再投喂 4 周的投喂模式下仅获得部分补偿,但在禁食 1 周再投喂 1 周的模式下获得完全补偿生长^[23]。因而,摸索出可充分提升特定鱼类实际 FR 与 FCE 的禁食投喂模式对于养殖实践上获得完全补偿生长是非常重要的。

实验 4 个处理组补偿效果不同,S1F1 组的补偿效果最好(终末体质量与对照组相对接近),其 FCE 显著高于对照组及其它 3 个处理组,其余 3 组随着间隔时间加大,生长率越低,补偿效果越差。这主要在于连续禁食时间越长,FCE 下降越大。与对照组相比,4 个实验组的实际 FR 均显著提高,但提高幅度不同。随着连续禁食时间增加,实际 FR 均提高很多,但到了一定程度,则无显著差异(S4F4 及 S8F8)。实验中,S1F1 组比其它处理组的实际 FR 显著要小,可能是由于禁食时间间隔短导致食欲不强。

实验采用的是“禁食—喂食—再禁食—再喂食……”的循环禁食处理,各处理组禁食时间与投喂时间相等,对照组持续喂食^[25-26],这种方式在每次补偿生长减弱时又重新将其激活,有利于不断激发鱼类的补偿生长潜能,增加鱼体补偿生长的时间,获得良好的生长效果^[27]。但实验中补偿效果欠佳,应该是禁食时间占的比例(1:1)过大所致,较长的禁食时间对鱼体机能可能有较大损害^[28]。特定鱼类表现补偿生长的程度与合适的禁食时间及禁食强度密切相关,对白鲢 (*Coregonus lavaretus*)、白梭吻鲈、杂交条纹鲈的研究表明,它们随着间歇性禁食具体条件的不同,可出现部分或完全补偿生长^[5-6,23]。因此有必要设计更适当的投喂方式,比如处理组的禁食时间要少于投喂时间,这一方式可能更接近实际生产的需求。初步的实验结果表明,在与本实验基本一致条件下,黄鳝在禁食 1 d 再投喂 4 d 的间歇性禁食中可获得完全补偿生长。启动动物补偿生长需要适当的禁食持续时间,但更大的再投喂时间比例即相对温和的禁食强度对于获得完全补偿生长可能更为重要^[23]。

3.2 间歇性禁食条件下消化及代谢的生理适应与变化

本实验中, S1F1 组和 S2F2 组胃组织的蛋白酶活性以及 S1F1 组后肠组织和肝脏组织的脂肪酶活性显著高于 S4F4 组、S8F8 组和对照组。宋国等的^[29]研究表明, 禁食后的条石鲷 (*Oplegnathus fasciatus*) 幼鱼肝脏蛋白酶与脂肪酶活力在恢复投喂后均有明显回升, 且蛋白酶活力恢复到持续投喂时的水平。在研究间歇性禁食对建鲤 (*Cyprinus carpio*) 肠道消化酶活性影响时发现, 间歇性禁食的投喂模式可显著提高这 2 种鱼类的蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等的活性^[30-31]。因而, 本实验的结果同样支持了上述研究结论。这显示, 在适度的间歇性禁食刺激下, 黄鳝可在消化功能上对营养不足产生生理适应性, 为生长补偿效应提供消化生理基础。至于实验中 S1F1 组和 S2F2 组各组织的淀粉酶活性与对照组相比无显著提升, 这可能与鱼类的食性有关, 也有可能与各实验所投喂的食物有关。对于草食性的团头鲂或杂食性的建鲤而言, 淀粉酶活性的提高可以增加对碳水化合物的消化能力从而在限食条件下获得补偿生长, 而肉食性的黄鳝需要通过提高淀粉酶活性来提高补偿生长能力的可能性则相对较小; 实验所用饵料为肉质的水蚯蚓, 而乔秋实等^[30-31]所用的饲料为含有一定比例碳水化合物的商品饲料。另一方面, 实验中, 遭受较大强度的间歇性禁食的 S4F4 组和 S8F8 组在实验结束时, 其消化酶活力与持续投喂的对照组相比无显著差异, 但同时又显著小于强度较小的间歇性禁食组 (S1F1 和 S2F2)。这说明短时间的禁食对黄鳝是合适的, 可一定程度上诱导消化酶活力的升高^[31], 而强度过大的禁食刺激可能因机体受损而使得其消化酶活力无法升高^[18,32]。

血液的生化指标可反映鱼类的营养供给水平及生理代谢状况^[33-35]。一般认为, 脂肪和糖原是鱼类的主要贮能物质, 其在禁食状态下主要消耗这 2 种物质^[36-37], 且骆作勇等^[38]的研究认为动物在禁食时首先动用的是血糖, 然后是脂类和蛋白。本实验的 64 d 期间, 间歇性禁食并未引起血液中总蛋白和葡萄糖含量的显著变化。由此可以认为, 在遭受本实验条件下的间歇性禁食后, 黄鳝的血糖及总蛋白水平在再摄食过程中得到恢复, 其能量代谢水平并未呈现下降的趋势, 这与已有

的对不同食性鱼类的研究结果是一致的^[39-41], 因而, 在禁食过程中, 鱼类通过代谢机能途径的调节, 其能量代谢水平可在一定范围内得到有效维持。与此同时, 相比持续投喂组或 S1F1 组, S2F2、S4F4 和 S8F8 实验组黄鳝的血清总胆固醇含量显著下降, 且其降幅随禁食的加强而增大。作为皮质激素和性激素的前体, 胆固醇在机体的代谢及其它生命活动中起到至关重要的作用^[38], 因而高强度的间歇性禁食可能对黄鳝的生理机能及代谢活动产生负面影响, 这从实验 S4F4 组和 S8F8 组蛋白酶及脂肪酶活性显著下降的结果中亦可得到一定程度的印证。

参考文献:

- [1] Eroldoğan O T, Kumlu M, Kiris G A, et al. Compensatory growth response of *Sparus aurata* following different starvation and refeeding protocols [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2006, 12(3): 203-210.
- [2] Ali M, Nicieza A, Wootton R J. Compensatory growth in fishes: a response to growth depression [J]. *Fish and Fisheries*, 2003, 4(2): 147-190.
- [3] Li Z H, Xie S, Wang J X, et al. Effect of intermittent starvation on growth and some antioxidant indexes of *Macrobrachium nipponense* (De Haan) [J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(5): 526-532.
- [4] Zhu X M, Xie S Q, Zou Z J, et al. Compensatory growth and food consumption in gibel carp, *Carassius auratus gibelio*, and Chinese longsnout catfish, *Leiocassis longirostris*, experiencing cycles of feed deprivation and re-feeding [J]. *Aquaculture*, 2004, 241(1-4): 235-247.
- [5] Känkänen M, Pirhonen J. The effect of intermittent feeding on feed intake and compensatory growth of whitefish *Coregonus lavaretus* L. [J]. *Aquaculture*, 2009, 288(1-2): 92-97.
- [6] Mattila J, Koskela J, Pirhonen J. The effect of the length of repeated feed deprivation between single meals on compensatory growth of pikeperch *Sander lucioperca* [J]. *Aquaculture*, 2009, 296(1-2): 65-70.
- [7] Tufan E O, Metin K, Baris S. Effects of starvation and re-alimentation periods on growth performance and hyperphagic response of *Sparus aurata* [J]. *Aquaculture Research*, 2006, 37(5): 535-537.
- [8] Oh S Y, Noh C H, Cho S H. Effect of restricted feeding regimes on compensatory growth and body

- composition of red sea bream, *Pagrus major* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2007, 38 (3):443 - 449.
- [9] Oh S Y, Noh C H, Kang R S, et al. Compensatory growth and body composition of juvenile black rockfish *Sebastes schlegeli* following feed deprivation [J]. Fisheries Science, 2008, 74(4):846 - 852.
- [10] Li W T, Liao X L, Yu X M, et al. Isolation and characterization of polymorphic microsatellites in a sex-reversal fish, rice field eel (*Monopterus albus*) [J]. Molecular Ecology Notes, 2007, 7 (4): 705 - 707.
- [11] 农业部渔业局. 2010 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2010.
- [12] 农业部渔业局. 2011 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- [13] Chu Z J, Wu Y X, Gong S Y, et al. Effects of estradiol valerate on steroid hormones and sex reversal of female rice field eel, *Monopterus albus* (Zuiew) [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2011, 42(1):96 - 104.
- [14] 杨代勤, 陈芳, 李道霞, 等. 黄鳝食性的初步研究[J]. 水生生物学报, 1997, 21(1):24 - 30.
- [15] 许宝红, 王亚楠, 肖调义, 等. 4 种淡水经济鱼类消化系统的组织学比较[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (32):47 - 55.
- [16] 杨代勤, 陈芳, 李道霞, 等. 黄鳝的营养素需要量及饲料最适能量蛋白比[J]. 水产学报, 2000, 24(3): 259 - 262.
- [17] 程玉冰, 夏伦志, 张新, 等. 不同蛋白和添加剂水平对黄鳝生长性能及肉品质的研究[J]. 饲料研究, 2009, (11):58 - 62.
- [18] 杨代勤, 陈芳, 阮国良, 等. 饥饿对黄鳝消化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18 (5): 1167 - 1170.
- [19] 俞建瑛, 蒋宇, 王善利. 生物化学实验技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [20] Heide A, Foss A, Stefansson S O, et al. Compensatory growth and fillet crude composition in juvenile Atlantic halibut: Effects of short term starvation periods and subsequent feeding [J]. Aquaculture, 2006, 261(1):109 - 117.
- [21] Wang Y, Li C, Qin J G, et al. Cyclical feed deprivation and refeeding fails to enhance compensatory growth in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. [J]. Aquaculture Research, 2009, 40 (2):204 - 210.
- [22] 姚峰, 甄恕其, 杨严鸥. 循环饥饿后异育银鲫幼鱼的补偿生长及部分生理生化指标的变化[J]. 淡水渔业, 2010, 40(4):39 - 43.
- [23] Turano M J, Borski R J, Daniels H V. Compensatory growth of pond-reared hybrid striped bass, *Morone chrysops* × *M. saxatilis*, fingerlings [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2007, 38(2):250 - 261.
- [24] Blanquet I, Oliva-Teles A. Effect of feed restriction on the growth performance of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) juveniles under commercial rearing conditions [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(8): 1255 - 1260.
- [25] 冯健, 覃志彪. 淡水养殖太平洋鲑循环饥饿后补偿性生长效果研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(5): 508 - 514.
- [26] Reimers E, Kjørrefjord A G, Stavostrand S M. Compensatory growth and reduced maturation in second sea winter farmed Atlantic salmon following starvation in February and March [J]. Journal of Fish Biology, 1993, 43(5):805 - 810.
- [27] Hayward R S, Noltie D B, Wang N. Use of compensatory growth to double hybrid sunfish growth rates [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1997, 126(2):316 - 322.
- [28] Miglavs L, Jobling M. Effect of feeding regime on food consumption, growth rates and tissue nucleic acids in juvenile Arctic charr, *Salvelines alpinus*, with particular respect to compensation growth [J]. Journal of Fish Biology, 1989, 34(6):947 - 957.
- [29] 宋国, 彭士明, 孙鹏, 等. 饥饿与再投喂及投喂频率对条石鲷幼鱼生长和消化酶活力的影响[J]. 中国水产科学, 2011, 18(6):1269 - 1277.
- [30] 李贵锋, 蒋广震, 刘文斌, 等. 不同蛋白质和能量水平对建鲤幼鱼生长性能、体组成和消化酶活性的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(2):225 - 232.
- [31] 乔秋实, 蒋广震, 刘文斌, 等. 周期性饥饿再投喂对建鲤 (*Cyprinus carpio* var. Jian) 生长、体组成、消化酶的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 367 - 373.
- [32] 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.
- [33] 王爱民, 韩光明, 封功能, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生产性能、营养物质消化及血液生化指标的影响 [J]. 水生生物学报, 2011, 35(1):80 - 87.
- [34] 张媛媛, 刘波, 戈贤平, 等. 不同脂肪源对异育银鲫生长性能、机体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及脂质代谢的影响 [J]. 水产学报, 2012, 36

- (7):1111-1118.
- [35] 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指标和糖代谢酶的影响[J]. 南京农业大学学报,2007,30(3):88-93.
- [36] 谢小军,邓利,张波. 饥饿对鱼类生理生态学影响的研究进展[J]. 水生生物学报,1998,22(2):181-188.
- [37] 谭肖英,罗智,王为民,等. 饥饿对小规格斑点叉尾鲷体质量及鱼体生化组成的影响[J]. 水生生物学报,2009,33(1):39-45.
- [38] 骆作勇,王雷,王宝杰,等. 不同投喂模式对奥利亚罗非鱼血液生化指标与生长性能的影响[J]. 中国水产科学,2007,14(5):743-748.
- [39] 殷帅文,林学群,陈洁辉. 饥饿以及再充分投喂对鳊鱼血液生化指标的影响[J]. 水产养殖,2007,28(1):7-9.
- [40] 乔志刚,张建平,牛景彦,等. 饥饿和再投喂对鲈鱼血液生理生化指标的影响[J]. 水生生物学报,2008,32(5):631-636.
- [41] 杨成辉,蔡勋,刘霞,等. 饥饿和再投喂对哲罗鱼幼鱼血液生理生化指标的影响[J]. 淡水渔业,2009,39(1):36-40.

The effects of intermittent food-deprivation on growth, digestive enzyme activities and serum biochemical indices in the rice-field eel (*Monopterus albus*)

RUAN Guoliang^{1,2,3}, LIU Jiafang¹, YANG Daiqin^{1,3*}

(1. Engineering Research Center of Wetland Agriculture in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Education,

College of Animal Science, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;

2. The State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

3. Hubei Collaborative Innovation Center for Freshwater Aquaculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: The experiment was carried out to investigate the effects of intermittent food-deprivation on growth, digestive enzyme activities and some serum biochemical indices in the rice-field eel, *Monopterus albus*. A 64-day growth trial with five feeding regimes was conducted using the live tubificid worms (*Limnodrilus hoffmeisteri*) as the food at $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. Groups of fish were deprived of food for 1, 2, 4, 8 day (s) and then followed by satiation re-feeding for the corresponding day (s), respectively (i. e. S1F1, S2F2, S4F4 and S8F8 groups). The fish fed to satiation daily throughout the experiment served as the control group (i. e. C). The results showed that, deprived fish had significantly lower specific growth rates (SGR), relative weight gains and final body weights, but significantly higher actual feeding rates, than that of the control fish ($P < 0.05$). Moreover, the fish in S1F1 group had significantly higher feed conversion efficiency (FCE) than those of any other groups ($P < 0.05$). It indicated that the partial growth compensation was elicited by various extents of intermittent food-deprivation, and that the fish of S1F1 group showed the best growth compensation. The protease activity of stomach in the S1F1 group was significantly higher than that in the S2F2 group ($P < 0.05$), and the protease activities of stomach in both of the two groups were significantly higher than those in other groups ($P < 0.05$). There was no difference in amylase activities of liver, stomach, foregut and hindgut among fish in all groups ($P > 0.05$). In the liver and hindgut, the S1F1 group had significantly higher lipase activities than other groups of the control, the S4F4 or the S8F8 ($P < 0.05$). In all groups of the deprived fish, the serum total protein contents and glucose contents were slightly higher and lower than that in the control group, respectively, however, there was no significant difference among the five treatments ($P > 0.05$). There was no significant difference in serum total cholesterol level between the control group and S1F1 group ($P > 0.05$), and the serum total cholesterol levels in these two groups were significantly higher than that of any other group ($P < 0.05$). In contrast, among the groups of S2F2, S4F4 or S8F8, the serum total cholesterol level gradually descended with the more serious intermittent food-deprivation. These results suggested that the growth compensation in the rice-field eel could be achieved partially through the enhancement of the activities of some of digestive enzymes, food utilization efficiency, and the physiological adaptability of digestion, and the desirable growth compensation could be elicited through mild intermittent food-deprivation that incorporates one-day of feed-deprivation with one-day of re-feeding.

Key words: *Monopterus albus*; intermittent feed-deprivation; growth compensation; digestive enzyme; serum biochemical indices

Corresponding author: YANG Daiqin. E-mail: yangdaiq@163.com