

## 不同循环投喂模式对半滑舌鲷的生长、 体成分组成、代谢和能量收支的影响

房景辉<sup>1</sup>, 田相利<sup>2</sup>, 姜海滨<sup>1\*</sup>, 刘相全<sup>1</sup>, 张锡佳<sup>1</sup>, 韦秀梅<sup>1</sup>, 董双林<sup>2</sup>

(1. 山东省海洋水产研究所, 山东 烟台 264006;

2. 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 研究了不同循环投喂模式对半滑舌鲷的生长、体成分组成、代谢和能量收支的影响。其中包括5个处理:C(对照组, 实验过程中持续投喂); S2F4组(饥饿2 d, 投喂4 d); S4F8组(饥饿4 d, 投喂8 d); S8F16组(饥饿8 d, 投喂16 d); S12F24组(饥饿12 d, 投喂24 d), 实验时间72 d。结果表明, 对照组的特定生长率( $SGR_w$ 和 $SGR_e$ )显著高于循环投喂各组( $P < 0.05$ )。对照组和S2F4组半滑舌鲷幼鱼的末体重没有显著差异( $P > 0.05$ ), 并且均显著高于其它各组( $P < 0.05$ )。对照组半滑舌鲷幼鱼的消化率显著低于其它各组( $P < 0.05$ ), 而能量消化率与S12F24组没有显著差异( $P > 0.05$ ), 但显著低于其它3个处理组( $P < 0.05$ )。S4F8组半滑舌鲷幼鱼饲料转化率显著低于S12F24组( $P < 0.05$ ), 对照组饲料转化率低于S2F4组和S12F24组但没有显著差异( $P > 0.05$ )。对照组半滑舌鲷幼鱼的摄食率显著低于其它各组( $P < 0.05$ )。体成分组成中, 蛋白含量随饥饿、投喂周期的延长而下降, S2F4组和对照组半滑舌鲷的蛋白含量没有显著差异( $P > 0.05$ )。S2F4组的耗氧率和排氮率均较低。对照组的摄食能显著高于其它各组( $P < 0.05$ ), S2F4组的呼吸能占摄食能的比例显著高于对照组( $P < 0.05$ )。研究表明, 半滑舌鲷幼鱼在循环投喂模式下, 具有较强的补偿生长能力, S2F4组具有完全补偿生长能力; 在较长的周期性饥饿条件下, 半滑舌鲷幼鱼体内的蛋白质含量会受到显著影响。

**关键词:** 半滑舌鲷; 循环投喂; 补偿生长; 体成分组成; 代谢; 能量收支

**中图分类号:** S 968.1

**文献标志码:** A

补偿生长是生物经历一段时间的生长抑制后在条件适宜时出现的生长速度比正常生长速度加快的现象, 其中抑制生长的因素有很多, 例如食物缺乏和低温、高温、酸碱度、密度等不适宜的环境条件, 均可诱使补偿生长的产生<sup>[1-2]</sup>。这一现象在很多生物上已有发现, 鱼类的补偿生长研究也已有报道<sup>[3-4]</sup>。根据以往的报道, 补偿生长可分为三种类型: 超补偿生长<sup>[5]</sup>, 完全补偿生长<sup>[6-7]</sup>和部分补偿生长<sup>[2, 8]</sup>。但是对很多种类, 其补偿生长情况依饥饿时间长短不同<sup>[1, 3, 9-10]</sup>。而在自然界中, 由于食物在空间和时间上的不确定性, 很多鱼类必然要经历饥饿和饱食交替的生活环境。因

此, 研究饥饿和投喂交替的循环投喂模式具有很大的理论和实践意义。以前对鲆鲽类的相关研究偶见报道<sup>[8, 11]</sup>, 而对于循环投喂模式下鲆鲽类的补偿生长研究报道较少<sup>[12]</sup>。

半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis* Günther)为近海常见的暖温性大型底层鱼类, 其肉质细腻、味道鲜美, 是一种经济价值很高且有一定养殖推广前景的名贵海水鱼类。目前, 随着半滑舌鲷大规模人工繁殖技术的突破<sup>[13-15]</sup>, 其商品鱼养成已逐渐成为产业化的主题, 而进一步确定其适宜的养殖条件和适合的投喂技术则是实现该种鱼规模化养殖所需要解决的关键问题。目前, 对半滑舌鲷

收稿日期: 2010-12-13 修回日期: 2011-05-12

资助项目: 现代农业产业技术体系(nycytx-50); 山东省良种工程项目“优质抗病速生鱼类良种选育”; 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2005BS07004)

通讯作者: 姜海滨, E-mail: haibinjiang326@163.com

的研究多集中于繁殖生物学及早期发育等方面<sup>[16-21]</sup>,关于半滑舌鳎的补偿生长研究还少见报道。本研究通过设置不同的饥饿再投喂周期,研究半滑舌鳎的生长、体成分组成、代谢和能量收支状况,从生理生态学角度探讨其补偿生长的原因和机制,丰富鲆类补偿生长的研究资料,以期为制定半滑舌鳎的投喂策略提供科学指导和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验动物来源与驯化

实验用半滑舌鳎幼鱼购于烟台海阳黄海水产

有限公司,体质量( $9.73 \pm 0.86$ ) g,个体健壮无病,活力强。

鱼进入实验室后,暂养于大型圆形玻璃钢水槽(1 000 L)内,所用海水为砂滤水,盐度 29~31, pH 8.0,氨态氮  $<0.19$  mg/L,水温 22 °C。在该条件下驯化、暂养 7 d。采用控温仪(WEIPRO MX300 IC)控制水温,以 2 级精密温度计进行校正,使其波动在  $\pm 0.1$  °C 以内。

每天早晚两次投喂配合饲料(北京日清吴科技有限公司),其在主要生化组成见表 1。摄食结束后 1 h 吸底换水,换水率 100%/d。光照时间设为 14 L:10 D,24 h 不间断充气。

表 1 饲料的能值及生化组成

Tab.1 The energy content and composition of the artificial pellet

能值/(kJ/g) energy content	蛋白质/% protein	脂肪/% fat	灰分/% ash	水分/% moisture	纤维素/% fibre	钙/% Ca	磷/% P
20.90 ± 0.13	50.00	10.00	<16.00	3.85 ± 0.05	3.00	2.3	>1.5

### 1.2 实验设计与管理

实验设置 5 个不同的投喂处理,其中 1 个处理持续投喂,设为对照组(C),另外 4 个处理是按“饥饿—投喂—再饥饿—再投喂”的循环投喂。

S2F4 组:饥饿 2 d,投喂 4 d,重复 12 次,S4F8 组:饥饿 4 d,投喂 8 d,重复 6 次,S8F16 组:饥饿 8 d,投喂 16 d,重复 3 次,S12F24 组:饥饿 12 d,投喂 24 d,重复 2 次。每个处理设 5 个重复,实验时间 72 d。

暂养结束后,实验鱼饥饿 24 h 使其肠内排空。然后挑选健壮活泼、大小接近的个体,称重后放入相应水族箱(规格为 55 cm × 30 cm × 35 cm)内进行实验,每个水族箱内各放养 5 尾幼鱼。同时,取 25 尾鱼称重后放入 -70 °C 冰箱保存,作为初始样品。水族箱水体的温度由控温仪(WEIPRO MX300 IC)控制,水温波动控制在  $\pm 0.1$  °C 以内。

实验期间,根据实验设计每天 08:00 和 19:00 分 2 次投喂配合饲料,每次投喂前称量饲料并记录(0.000 1g),根据残饵剩余情况适时调整投喂量。每天在投喂前 40 min 以及摄食 1 h 后收集粪便,并于 70 °C 下烘干保存。

实验于 2008 年 6 月 17 日开始,到 2008 年 8 月 27 日结束。实验用鱼饥饿 24 h 后,使其肠内排空,然后测定呼吸代谢,再称量并全部取样用于

体成分和能值测定。

### 1.3 样品测定

实验过程中所取鱼体、粪便以及饲料样品均于 70 °C 下烘干后称重、研磨,然后进行相关分析。其中,鱼体和饲料中蛋白质含量由氮含量 × 6.25 得到,而氮含量用 Vario EL III 型元素分析仪测定,脂肪测定采用乙醚抽提法,灰分测定采用马福炉焚烧法(550 °C)。鱼体、饲料和粪便能值利用 PARR1281 型氧弹式热量计测定。水中溶解氧采用 YSI-5000 测定,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度用次溴酸钠氧化法测定。

### 1.4 能量收支计算

半滑舌鳎幼鱼的摄食(C)、生长(G)、呼吸(R)、粪便(F)和排泄(U)的能量符合下列关系<sup>[22]</sup>:

$$C = G + F + U + R$$

式中,C 为摄入的饲料能值,G 为生长能,F 为排粪能,U 为排泄能,R 为代谢能。排泄能以式计算:

$$U = (C_N - G_N - F_N) \times 24\ 830$$

式中,C<sub>N</sub>为摄食食物中所含的氮,G<sub>N</sub>为鱼体生长增加的氮,F<sub>N</sub>为粪便中所含的氮,24 830 为每克氮的能值(J/g)<sup>[23]</sup>。预实验表明,半滑舌鳎的主要排泄物为氨氮,尿素排泄量很小,对实验结果没有影响,因而在本研究中忽略不计。呼吸耗能

由能量收支式  $R = C - G - F - U$  求出。

### 1.5 数据的计算与处理

实验期间半滑舌鲷幼鱼特定生长率、饲料转化率、消化率和摄食率计算如下:

$$SGR_w = 100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t$$

$$SGR_e = 100 \times (\ln E_t - \ln E_0) / t$$

$$FCE_w = 100 \times (W_t - W_0) / C_w$$

$$FCE_e = 100 \times (E_t - E_0) / C_e$$

$$ADR_w = 100 \times (C_w - F_w) / C_w$$

$$ADR_e = 100 \times (E_t - E_0) / E_t$$

$$FR = 100 \times C_w [t \times (W_t + W_0) / 2]$$

式中,  $SGR_w$  和  $SGR_e$  分别为以质量和能量表示的半滑舌鲷幼鱼的特定生长率,  $FCE_w$  和  $FCE_e$  分别为以质量和能量表示的饲料转化率,  $ADR_w$  和  $ADR_e$  分别为以质量和能量表示的消化率,  $FR$  为摄食率,  $C_w$  和  $C_e$  分别为以质量和能量表示的半滑舌鲷幼鱼的摄食量,  $W_t$  和  $W_0$  为半滑舌鲷幼鱼的末体质量和初体质量,  $E_t$  和  $E_0$  为以能量表示的末体质量和初体质量,  $t$  为实验时间。

所得数据用单因素方差分析 (ANOVA) 及 Duncan 氏多重比较进行处理, 以  $P < 0.05$  作为差异显著水平。

## 2 结果

### 2.1 生长

各处理半滑舌鲷幼鱼的初始体质量没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。对照组的特定生长率 ( $SGR_w$  和  $SGR_e$ ) 显著高于循环投喂各组 ( $P < 0.05$ )。S2F4 组半滑舌鲷幼鱼的  $SGR_w$  显著高于其它各循环投喂组 ( $P < 0.05$ )。对照组和 S2F4 组半滑舌

鲷幼鱼的末体质量没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 并且均显著高于其它各组 ( $P < 0.05$ ) (图 1)。其中对照组的末体质量最高, 为 35.10 g, S4F8、S8F16 和 S12F24 组的末体质量没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。

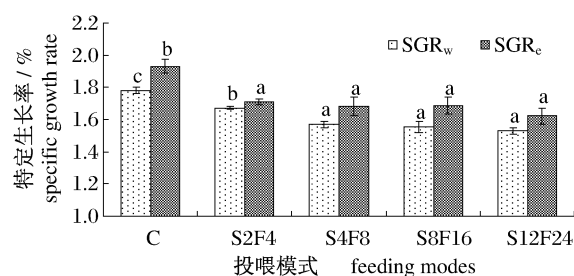


图 1 不同投喂模式下半滑舌鲷的特定生长率

图中不同处理之间带有不同字母表示相互之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Fig. 1 Specific growth rate of tongue sole in different feeding modes during 72 d experiment

The data with different letters at different treatments means significantly different with each other ( $P < 0.05$ ). The same below.

### 2.2 消化率、饲料转化率和摄食率

由表 2 可以看出, 对照组半滑舌鲷幼鱼的消化率显著低于其它各组 ( $P < 0.05$ ), 而能量消化率与 S12F24 组没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但显著低于其它 3 个处理组 ( $P < 0.05$ )。S4F8 组半滑舌鲷幼鱼饲料转化率显著低于 S12F24 组 ( $P < 0.05$ ), 对照组饲料转化率低于 S2F4 组和 S12F24 组但没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。对照组半滑舌鲷幼鱼的摄食率显著低于其它各组 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同投喂模式下半滑舌鲷的生长、消化率、饲料转化率和摄食率

Tab. 2 Growth, apparent digestion rate, food conversion efficiency, energy conversion efficiency and feeding rate of tongue sole at different feeding modes

处理 treatments	初体质量/g initial weight	末体质量/g final weight	饲料转化率/g food conversion efficiency	能量转化率/% energy conversion efficiency	消化率/% digestion rate	能量消化率/% energy digestion rate	摄食率/% feeding rate
对照 control	9.73 ± 0.36	35.10 ± 0.56 <sup>b</sup>	93.09 ± 1.08 <sup>ab</sup>	23.42 ± 0.99	84.19 ± 0.61 <sup>a</sup>	91.52 ± 0.57 <sup>a</sup>	1.69 ± 0.03 <sup>a</sup>
S2F4	9.83 ± 0.33	32.75 ± 0.47 <sup>b</sup>	96.47 ± 1.74 <sup>ab</sup>	21.81 ± 0.85	89.06 ± 0.56 <sup>c</sup>	93.47 ± 0.44 <sup>c</sup>	2.33 ± 0.03 <sup>c</sup>
S4F8	9.72 ± 0.21	30.16 ± 0.72 <sup>a</sup>	91.75 ± 2.07 <sup>a</sup>	22.29 ± 0.69	88.33 ± 0.31 <sup>c</sup>	92.96 ± 0.22 <sup>bc</sup>	2.33 ± 0.04 <sup>c</sup>
S8F16	9.68 ± 0.25	29.69 ± 1.10 <sup>a</sup>	92.25 ± 0.91 <sup>ab</sup>	23.04 ± 0.77	89.27 ± 0.35 <sup>c</sup>	93.83 ± 0.21 <sup>c</sup>	2.29 ± 0.02 <sup>c</sup>
S12F24	9.94 ± 0.30	29.91 ± 0.83 <sup>a</sup>	98.03 ± 2.92 <sup>b</sup>	23.49 ± 0.95	86.20 ± 0.45 <sup>b</sup>	92.05 ± 0.34 <sup>ab</sup>	2.13 ± 0.02 <sup>b</sup>

注: 表中不同处理之间带有不同字母的数据表示相互之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Notes: The data with different letters in the same column at different feeding modes means significantly different with each other ( $P < 0.05$ ). The same below.

### 2.3 体成分组成

S2F4 组半滑舌鳎的水分含量显著高于对照组和 S8F16 组 ( $P < 0.05$ )。蛋白含量随饥饿投喂周期的延长而下降, S2F4 组和对照组半滑舌鳎的蛋白含量没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但显著高于

S8F16 组和 S12F24 组的蛋白含量 ( $P < 0.05$ )。脂肪含量在 S8F16 组最高, 对照组和 S2F4 组均略低于其它各组 (表 3)。S2F4 组半滑舌鳎的灰分含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 但与其它各组没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 3 不同投喂模式下半滑舌鳎的体成分组成

处理 treatments	水分/% moisture	脂肪/% Lipid	蛋白/% protein	灰分/% ash
对照 control	78.00 ± 0.56 <sup>a</sup>	14.17 ± 0.45 <sup>a</sup>	73.20 ± 0.25 <sup>c</sup>	12.23 ± 0.27 <sup>a</sup>
S2F4	79.79 ± 0.24 <sup>b</sup>	13.59 ± 0.59 <sup>a</sup>	73.33 ± 0.79 <sup>c</sup>	13.16 ± 0.22 <sup>b</sup>
S4F8	79.17 ± 0.28 <sup>ab</sup>	14.80 ± 0.49 <sup>ab</sup>	72.03 ± 0.53 <sup>bc</sup>	12.51 ± 0.21 <sup>ab</sup>
S8F16	78.31 ± 0.43 <sup>a</sup>	15.90 ± 0.35 <sup>b</sup>	70.16 ± 0.52 <sup>a</sup>	12.57 ± 0.26 <sup>ab</sup>
S12F24	78.64 ± 0.43 <sup>ab</sup>	14.52 ± 0.60 <sup>ab</sup>	70.58 ± 0.60 <sup>ab</sup>	12.38 ± 0.30 <sup>ab</sup>

### 2.4 呼吸代谢

不同投喂模式下半滑舌鳎的耗氧率和排氨率见图 2。在实验结束时, 循环投喂组的耗氧率和排氨率随饥饿投喂周期的延长而逐渐升高。S2F4 组半滑舌鳎的耗氧率显著低于其它各组 ( $P < 0.05$ ), S4F8 组半滑舌鳎的耗氧率与对照组没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。S2F4 组半滑舌鳎的排氨率与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但均显著低于其它各组 ( $P < 0.05$ )。

### 2.5 能量收支

实验结束时, 不同投喂模式下半滑舌鳎的体能值没有显著差异 ( $P > 0.05$ , 表 4)。对照组的摄食能、生长能和粪能均显著高于其它处理。排泄能在 S12F24 组最低 ( $P < 0.05$ ), 而其它各组没有

显著差异 ( $P > 0.05$ )。对照组的呼吸能最高, 但是与 S2F4 组没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。

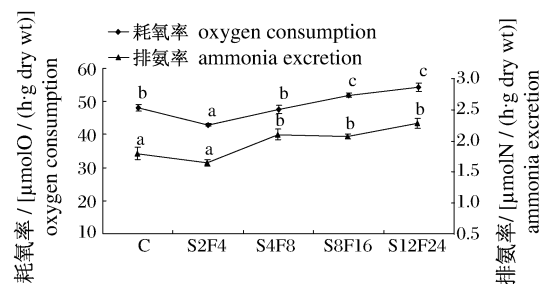


图 2 不同投喂模式下半滑舌鳎的耗氧率和排氨率  
Fig. 2 The oxygen consumption and ammonia excretion of tongue sole in different feeding modes at the end of the 72 d experiment

表 4 不同投喂模式下半滑舌鳎的能量收支各组分能值及体能值

处理 treatments	C/[J/(g·d)]	G/[J/(g·d)]	F/[J/(g·d)]	U/[J/(g·d)]	R/[J/(g·d)]	体能值/(kJ/g) body energy
对照 control	343.32 ± 5.73 <sup>c</sup>	80.32 ± 2.97 <sup>b</sup>	29.06 ± 1.24 <sup>c</sup>	28.81 ± 0.94 <sup>b</sup>	205.13 ± 1.80 <sup>c</sup>	22.35 ± 0.33
S2F4	315.02 ± 4.73 <sup>b</sup>	68.56 ± 1.70 <sup>a</sup>	20.56 ± 1.38 <sup>ab</sup>	27.97 ± 0.55 <sup>b</sup>	197.93 ± 3.00 <sup>bc</sup>	22.44 ± 0.40
S4F8	315.02 ± 5.74 <sup>b</sup>	70.20 ± 2.41 <sup>a</sup>	22.18 ± 0.77 <sup>ab</sup>	28.07 ± 0.71 <sup>b</sup>	194.57 ± 2.25 <sup>b</sup>	22.90 ± 0.20
S8F16	310.49 ± 3.27 <sup>b</sup>	71.55 ± 2.69 <sup>a</sup>	19.16 ± 0.73 <sup>a</sup>	27.80 ± 0.48 <sup>b</sup>	191.97 ± 2.15 <sup>b</sup>	22.43 ± 0.36
S12F24	288.25 ± 2.63 <sup>a</sup>	67.65 ± 2.38 <sup>a</sup>	22.92 ± 1.00 <sup>b</sup>	24.94 ± 0.33 <sup>a</sup>	172.74 ± 3.61 <sup>a</sup>	22.09 ± 0.38

注: C. 摄食能; G. 生长能; F. 粪便能; U. 排泄能; R. 呼吸能。下同。

Notes: C. food energy; G. growth energy; F. feces energy; U. excretion energy; R. respiration energy. The same below.

由表 5 可以看出, 不同投喂模式下半滑舌鳎的生长能占摄食能的比例没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而对照组的粪能占摄食能的比例最高并且与 S12F24 组没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但是显著高于其它各组 ( $P < 0.05$ )。对照组排泄能占摄

食能的比例最低为 8.38%, 这与 S12F24 组没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但是显著低于其它各组 ( $P < 0.05$ )。呼吸能在能量收支各项中所占比例最高, S2F4 组呼吸能占摄食能的比例显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。

表 5 不同投喂模式下半滑舌鲷的能量收支占摄食能的百分比  
Tab. 5 Energy allocation of tongue sole at different feeding modes

处理 treatments	C	G	F	U	R	%
对照 control	100	23.42 ± 0.99	8.48 ± 0.57 <sup>c</sup>	8.38 ± 0.16 <sup>a</sup>	59.71 ± 1.09 <sup>a</sup>	
S2F4	100	21.81 ± 0.85	6.53 ± 0.44 <sup>a</sup>	8.87 ± 0.06 <sup>b</sup>	62.78 ± 0.87 <sup>b</sup>	
S4F8	100	22.29 ± 0.69	7.04 ± 0.22 <sup>ab</sup>	8.91 ± 0.09 <sup>b</sup>	61.76 ± 0.59 <sup>ab</sup>	
S8F16	100	23.04 ± 0.77	6.17 ± 0.21 <sup>a</sup>	8.95 ± 0.09 <sup>b</sup>	61.84 ± 0.72 <sup>ab</sup>	
S12F24	100	23.49 ± 0.95	7.95 ± 0.34 <sup>bc</sup>	8.65 ± 0.06 <sup>ab</sup>	59.90 ± 0.79 <sup>a</sup>	

### 3 讨论

在影响鱼类补偿生长的因素中,饥饿对补偿生长的影响是以往研究最多的,也是一个很重要的内容<sup>[1,3,5,8]</sup>。对于饥饿胁迫之后鱼类的补偿生长机制,根据不同的研究和研究对象而有所差别。对不同种类而言,补偿生长的发生规律往往不同<sup>[5,24]</sup>。而对同一种鱼,由于胁迫程度不同,特别是饥饿时间不同可能产生不同程度的补偿生长效果<sup>[3]</sup>。而半滑舌鲷就属于这一类型<sup>[34]</sup>,不同的胁迫条件可能会激发不一样的补偿生长能力。在经历饥饿后恢复投喂,其生长速度会比对照组快,因而,在半滑舌鲷的养殖过程中,采取“饥饿—再投喂—再饥饿—再投喂……”的投喂策略有可能激发其较强的补偿生长能力。本研究证实了这一点,在投喂时间仅为对照组 2/3(总时间 72 d)的情况下,不同的循环投喂组均表现出了较强的补偿生长能力。特别是 S2F4 组实现了完全补偿生长,虽然其它各组实现部分补偿生长,其末体质量均高于对照组在第 48 天时的体质量 27.94 g。这表明,循环投喂模式能够激发半滑舌鲷较强的补偿生长能力,这在同属于鲆鲽类的牙鲆中有类似发现<sup>[12]</sup>,在该研究中 S2F4 组的牙鲆幼鱼经过 36 d 的循环投喂处理,末体重显著高于对照组。

鱼类在饥饿后恢复投喂往往会表现出以下特点:代谢降低食物转化率提高<sup>[24]</sup>;增加食欲提高摄食率<sup>[25-26]</sup>;增加食欲同时提高食物转化率等<sup>[27]</sup>。本研究发现,循环投喂组的消化率和摄食率显著高于对照组,而食物转化率均与对照组无显著性差异。这说明半滑舌鲷在循环投喂的模式下实现补偿生长主要是通过增加食欲提高摄食率同时提高消化率来实现的,这与王岩<sup>[25]</sup>的研究结果相似。但是循环投喂组消化率的显著提高没有伴随较高的食物转化率,在 TIAN 等<sup>[34]</sup>的研究中发现半滑舌鲷在饥饿期间的代谢率较低而在恢复

投喂后其代谢会显著升高,一段时间后,又会降低到对照组的水平甚至低于对照组的代谢水平。在本研究中,恢复投喂的时间恰好在半滑舌鲷代谢较高的时间段内,并且这期间的能量消耗要高于饥饿期间节省的能量消耗,因此较多的营养物质在此期间被消耗,导致消化率提高的优势没有在食物转化率上体现出来。这一点本研究从能量分配的角度给予证实,在能量收支式中,循环投喂组的摄食能显著低于对照组的摄食能,而较多比例的摄食能又分配给了排泄能和呼吸能,故而生长能较低,食物转化率也不高。

在饥饿过程中,鱼类会动用身体组织中贮存的能源物质来维持其基本代谢。不同鱼类对能源物质的利用种类和次序也各有差异。多数鱼类在饥饿时首先利用糖类和脂肪作为能源物质<sup>[28-31]</sup>,也有鱼类首先利用蛋白作为能源物质<sup>[32-33]</sup>。TIAN 等<sup>[34]</sup>对半滑舌鲷饥饿后的补偿生长研究发现,其在饥饿过程中首先动用脂肪作为能源物质。而本研究发现随着饥饿周期的延长,半滑舌鲷幼鱼的蛋白含量显著下降,而其它体成分与对照组相比变化不明显。这说明较长时间的饥饿胁迫使半滑舌鲷在脂肪消耗到一定程度后开始利用蛋白作为能源物质,但是恢复投喂时半滑舌鲷首先恢复体内脂肪,而恢复投喂的时间不足以完成蛋白水平的恢复,这样使经受较长时间饥饿胁迫的半滑舌鲷蛋白含量在实验结束时仍显著低于对照组,这种补偿生长特点少见报道,在沈文英等<sup>[35]</sup>对草鱼鱼种的研究中发现了这一现象。而 MACHADO 等<sup>[36]</sup>发现雷氏鲷(*Rhamdia hilarii*) 在恢复投喂期间脂肪和蛋白质同时恢复。因此,鱼类可能会因为胁迫条件、种类、生活方式等差异而产生不一样的补偿生长特点。

REIGH 等<sup>[4]</sup>在对南方鲈(*Silurus meridionalis*) 的研究中发现,在养殖实践中实行合理的循环投喂模式可以减少支出,增加经济效益。本研究表

明,半滑舌鳎在循环投喂过程中表现出很好的补偿生长性能,特别是 S2F4 组在节省饲料消耗和促进生长方面比其它各组优越。因此,在养殖实践中可以适时对半滑舌鳎进行短期饥饿以激发其补偿生长能力,同时可以节省饲料投入,减少开支。而进一步研究循环投喂模式在规模化生产下对经济效益的贡献,将具有更加重要的意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] NIKKI J, PIRHONEN J, JOBLING M, *et al.* Compensatory growth in juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), held individually [J]. *Aquaculture*, 2004, 235: 285 - 296.
- [ 2 ] 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: 109 - 117.
- [ 3 ] TIAN X, QIN J G. A single phase of food deprivation provoked compensatory growth in barramundi *Lates calcarifer* [J]. *Aquaculture*, 2003, 224: 169 - 179.
- [ 4 ] REIGH R C, WILLIAMS M B, JACOB B J. Influence of repetitive periods of fasting and satiation feeding on growth and production characteristics of channel catfish, *Ictalurus punctatus* [J]. *Aquaculture*, 2006, 254: 506 - 516.
- [ 5 ] 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: 316 - 322.
- [ 6 ] XIE S, ZHU X, CUI Y, *et al.* Compensatory growth in the gibel carp following feed deprivation: temporal patterns in growth, nutrient deposition, feed intake and body composition [J]. *Journal of Fish Biology*, 2001, 58: 999 - 1 009.
- [ 7 ] ZHU X, XIE S, LEI W, *et al.* Compensatory growth in the Chinese longsnout catfish, *Leiocassis longirostris* following feed deprivation: Temporal patterns in growth, nutrient deposition, feed intake and body composition [J]. *Aquaculture*, 2005, 248: 307 - 314.
- [ 8 ] PAUL A J, PAUL J M, SMITH R L. Compensatory growth in Alaska yellowfin sole, *Pleuronectes asper*, following food deprivation [J]. *Journal of Fish Biology*, 1995, 46: 442 - 448.
- [ 9 ] QIAN X, CUI Y, XIONG B, *et al.* Compensatory growth, feed utilization and activity in gibel carp, following feed deprivation [J]. *Journal of Fish Biology*, 2000, 56: 228 - 232.
- [ 10 ] WANG Y, CUI Y, YANG Y, *et al.* Compensatory growth in hybrid tilapia, *Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*, reared in seawater [J]. *Aquaculture*, 2000, 189: 101 - 108.
- [ 11 ] SÆTHER B-S, JOBLING M. The effects of ration level on feed intake and growth, and compensatory growth after restricted feeding, in turbot *Scophthalmus maximus* L. [J]. *Aquaculture Research*, 1999, 30: 647 - 653.
- [ 12 ] 姜海波,姜志强. 周期性饥饿-再投喂对牙鲆幼鱼生长和饲料利用的影响 [J]. *大连水产学院学报*, 2007, 22(3): 231 - 234.
- [ 13 ] 丁爱侠. 半滑舌鳎人工育苗技术 [J]. *齐鲁渔业*, 2004, 21(12): 37.
- [ 14 ] 柳学周,徐永江,马爱军,等. 温度、盐度、光照对半滑舌鳎胚胎发育的影响及孵化条件调控技术的研究 [J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(6): 1 - 6.
- [ 15 ] 柳学周,庄志猛,马爱军,等. 半滑舌鳎繁殖生物学及繁育技术研究 [J]. *海洋水产研究*, 2005, 26(3): 15 - 24.
- [ 16 ] 杜伟,蒙子宁,薛志勇,等. 半滑舌鳎胚胎发育及其与水温的关系 [J]. *中国水产科学*, 2004, 11(1): 48 - 52.
- [ 17 ] ZHUANG Z M, WU D, ZHANG S C, *et al.* G-banding patterns of the chromosomes of tonguefish *Cynoglossus semilaevis* Günther, 1873 [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2006, 22(5): 437 - 440.
- [ 18 ] 马爱军,王新安,庄志猛,等. 半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*) 与摄食行为相关的特定感觉器官研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(3): 240 - 245.
- [ 19 ] LIAO X, SHAO C W, TIAN Y S, *et al.* Polymorphic dinucleotide microsatellites in tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [J]. *Molecular Ecology Notes*, 2007, 7(6): 1147 - 1149.
- [ 20 ] LIU Y G, BAO B L, LIU L X, *et al.* Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci from RAPD product in half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) and a test of cross-species amplification [J]. *Molecular Ecology Resources*, 2008, 8(1): 202 - 204.
- [ 21 ] LIU Y G, SUN X Q, GAO H, *et al.* Microsatellite markers from an expressed sequence tag library of half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) and their application in other related fish species [J]. *Molecular Ecology Notes*, 2007, 7(6): 1242 - 1244.

- [22] CARFOOT T H. Animal Energetics [ M ]. New York: Academic Press, 1987: 407 - 515.
- [23] 崔奕波. 鱼类生物能量学的理论与方法 [ J ]. 水生生物学报, 1989, 13(4): 369 - 383.
- [24] 姜志强, 贾泽梅, 韩延波, 等. 美国红鱼继饥饿后的补偿生长及其机制 [ J ]. 水产学报, 2002, 26(1): 67 - 72.
- [25] 王岩. 海水养殖罗非鱼补偿生长的生物学能量学机制 [ J ]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 233 - 239.
- [26] CALOW P. On the regulation nature of individual growth; some observations from freshwater snail [ J ]. Zool, 1973, (170): 415 - 428.
- [27] KIM M K, LOVELL R T. Effect of restricted feeding regimens on compensatory weight gain and body tissue changes in channel catfish *Ictalurus punctatus* in ponds [ J ]. Aquaculture, 1995, 135: 285 - 293.
- [28] INCE B W, THORPE A. The effects of starvation and force-feeding on the metabolism of the northern pike, *Esox lucius* L [ J ]. Journal of Fish Biology, 1976, 8: 79 - 88.
- [29] SATOH S, TAKEUCHI T, WATANABE T. Effect of starvation and environmental temperature on proximate and fatty acid composition of *Tilapia nilotica* [ J ]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1984, 50: 79 - 84.
- [30] WEBSTER C D, TIDWELL J H, GOODGAME L S, *et al.* Effects of fasting on fatty acid composition of muscle, liver and abdominal fat in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [ J ]. Journal of the World Aquaculture Society, 1994, 25: 126 - 134.
- [31] 韩加凤, 华雪铭, 黄旭雄, 等. 壳聚糖投喂方式对草鱼抗饥饿胁迫能力的影响 [ J ]. 水产学报, 2010, 34(3): 459 - 465.
- [32] MOMMSEN T P, FRENCH C J, HOCHACHKA P W. Sites and patterns protein and amino acid utilization during the spawning migration of salmon [ J ]. Canadian Journal of Zoology, 1980, 58: 1785 - 1799.
- [33] 区又君, 刘泽伟. 千年笛鲷幼鱼的饥饿和补偿生长 [ J ]. 水产学报, 2007, 31(3): 323 - 328.
- [34] TIAN X, FANG J, DONG S. Effects of starvation and recovery on the growth, metabolism and energy budget of juvenile tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) [ J ]. Aquaculture, 2010, 310: 122 - 129.
- [35] 沈文英, 林浩然, 张为民. 饥饿和恢复投喂对草鱼鱼种生化组成的影响 [ J ]. 动物学报, 1999, 45(4): 404 - 412.
- [36] MACHADO C R, GAROFALO M A R, MIGLIORINI R H. Effects of starvation, re-feeding and insulin on energy-linked metabolic process in catfish (*Rhamdio hilarii*) adapted to a carbohydrate-rich diet [ J ]. General and Comparative Endocrinology, 1988, 71: 429 - 437.

## Effects of repetitive periods of fasting and satiation feeding on the growth, body composition, metabolism and energy budget of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)

FANG Jing-hui<sup>1</sup>, TIAN Xiang-li<sup>2</sup>, JIANG Hai-bin<sup>1\*</sup>, LIU Xiang-quan<sup>1</sup>,  
ZHANG Xi-jia<sup>1</sup>, WEI Xiu-mei<sup>1</sup>, DONG Shuang-lin<sup>2</sup>

(1. Marine Fisheries Research Institute of Shandong, Yantai 264006, China;

2. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** Compensatory, or catch-up, growth is a period of unusually fast growth that follows a period of reduced growth resulting from restricted food availability, or some other unfavorable environmental conditions, including low temperatures, hypoxic conditions, density alternation, etc. The compensatory phenomenon has been found in a wide range of aquatic animals including fish. For some fish species, the magnitude and duration of compensatory growth depended on the length of food deprivation. In the wild, fish often suffer starvation because of unstable food supply. And the underlying physiological mechanism for increased growth potential during compensatory growth is still inconsistent and poorly understood. In the present study, the juvenile tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*), an important cultured fish in China, was selected to research the effects of repetitive periods of fasting and satiation feeding on the growth, body composition, metabolism and energy budget. There were five groups: the control fed *ad libitum* throughout the experiment (C), and other four groups which were subjected to repetitive periods of fasting and satiation feeding (2:4, 4:8, 8:16 and 12:24 days for group S2F4, S4F8, S8F16 and S12F24). Feces and uneaten food were collected twice a day by pipetting during the experiment. All samples were measured at the end of the experiment. The specific growth (SGR including SGR<sub>w</sub>, in terms of weight, and SGR<sub>e</sub>, in terms of energy) in group C were significantly higher than those in other groups ( $P < 0.05$ ). There was no significant difference in body weight between S2F4 and C fish ( $P > 0.05$ ), and both of them were significantly higher than those in other groups. The apparent digestion rate in C fish was significantly lower than those in other three groups ( $P < 0.05$ ). The energy digestion rate in C fish was not significantly different from that in S12F24 fish ( $P > 0.05$ ), but was significantly lower than those in the other three groups ( $P < 0.05$ ). The food conversion efficiency in S4F8 fish was significantly lower than that in S12F24 fish ( $P < 0.05$ ). The feeding rate in C fish was the lowest ( $P < 0.05$ ). The protein content in fish decreased with increasing starvation period. There was no significant difference in protein content between S2F4 and C fish ( $P > 0.05$ ). The oxygen consumption and ammonia excretion were lower in S2F4 fish than those in other groups. The food energy of the control group was the highest ( $P < 0.05$ ). The food energy assimilated to metabolism in S2F4 fish was higher than that in C fish ( $P < 0.05$ ). The data indicated that the juvenile tongue sole of S2F4 showed complete compensatory growth. The complete compensatory growth in juvenile tongue sole could be attributed to hyperphagia and an improved digestion rate. During the repetitive periods of fasting and satiation feeding, the protein content in juvenile tongue sole was significantly affected. The results provided useful evidence to understand the feeding biology of tongue sole, and were conducive to the best management in large-scale aquaculture, especially indoor intensive culture.

**Key words:** *Cynoglossus semilaevis*; repetitive re-feeding; compensatory growth; metabolism; body composition; energy budget

**Corresponding author:** JIANG Hai-bin. E-mail: haibinjiang326@163.com