

放养规格对银化期大西洋鲑生长的影响及生理响应机理

张 墨¹, 高霄龙^{1,2}, 李 贤¹, 曲善村³, 刘 鹰^{1,4*}

(1.中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.山东东方海洋科技股份有限公司, 烟台 264003;
4.南通中国科学院海洋研究所海洋科学与技术研究发展中心, 南通 226019)

摘 要: 内分泌系统在调节大西洋鲑 (*Salmo salar* L.) 的银化过程中, 除了要尽快建立更高效的渗透调节机制外, 鱼体自身的生理反应变化还要更好地适应降海后的生活。试验研究了平均体质量(30.25±2.12)g (SW1)、(24.27±1.59)g (SW2)和(18.05±2.46)g (SW3)大西洋鲑, 1~42 d 光照周期为 12L:12D; 43~84 d 为全光照下 (24L:0D) 的生长及生理响应机理。试验结果表明, SW2 组大西洋鲑的肥满度、日增质量、饲料转化率、净增质量最高, 与其他组差异显著 ($P<0.05$)。SW2 组体质量、体长特定生长率均显著高于其他处理组 ($P<0.05$), 各组间体质量、体长变异系数差异显著 ($P<0.05$)。试验前 6 周不同处理组大西洋鲑体长变异系数差异不显著 ($P>0.05$)。后 6 周全光照时, SW1、SW2 组体长变异系数显著增加, 且 SW1 组显著高于其他组 ($P<0.05$)。SW3 组的大西洋鲑体质量变异系数变化较大。前 6 周光照期为 12L:12D 时, SW1、SW2 两组体质量变异系数差异不显著 ($P>0.05$), 后 6 周改为全光照时, 3 个处理组间体质量变异系数差异减小。但在 84 d 时, SW3 组体质量变异系数显著高于其他组 ($P<0.05$)。随着养殖规格的增大, 血红蛋白浓度升高, 红细胞数目增加, 说明鱼体需氧量增加。SW3 组白细胞数目、淋巴细胞数目和中性粒细胞数目最高, 表明鱼体抗病能力强。红细胞数目在 SW1 和 SW2 组间无显著差异 ($P>0.05$), 但均显著高于 SW3 组 ($P<0.05$)。血栓细胞数目随着放养规格的增大而下降, 且在 3 个规格组之间差异显著 ($P<0.05$)。中性粒细胞数目在 3 个规格组之间并没有显著性差异 ($P>0.05$)。SW2 组总蛋白、白蛋白含量最高, 且各组间差异显著 ($P<0.05$)。总胆固醇、甘油三酯浓度随鱼体规格增大而增加 ($P<0.05$), 表明大西洋鲑血液和体内对能量的利用增强。SW2 组代谢产物尿酸、尿素浓度最高, 且 SW1、SW2 组的浓度值均显著高于 SW3 组 ($P<0.05$)。SW3 组大西洋鲑血清中总胆红素显著高于其他两组 ($P<0.05$)。各组间大西洋鲑血清中葡萄糖浓度没有显著性差异 ($P>0.05$)。SW3 组肌酸激酶浓度最高, 但各组间没有显著性差异 ($P>0.05$)。该研究结果建议选择体质量(24.27±1.59)g 的大西洋鲑开始银化, 利于优化养殖条件、以较低成本增加单位水体养殖产量和苗种规模化生产。

关键词: 生长; 生理; 生化; 大西洋鲑; 银化; 放养规格

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.031

中图分类号: S967.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0221-07

张 墨, 高霄龙, 李 贤, 曲善村, 刘 鹰. 放养规格对银化期大西洋鲑生长的影响及生理响应机理[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 221-227. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.031 <http://www.tcsae.org>

Zhang Mo, Gao Xiaolong, Li Xian, Qu Shancun, Liu Ying. Effect of different sizes on growth during smoltification in atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and its mechanism of physiological response[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 221-227. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.031 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

大西洋鲑 (*Salmo salar* L.) 是溯河产卵型的鱼类。稚鱼阶段后期, 由淡水转向海水中生活。这种栖息地的变化, 使得在淡水中的大西洋鲑稚鱼开始在体型和生理结构上均发生一定改变, 这个改变过程称为银化 (smoltification)^[1]。银化期是个关键时期, 在此阶段大西

洋鲑在生理、形态、行为等方面均发生变化, 为适应海洋环境做准备^[2]。在银化过程中, 内分泌系统调节大西洋鲑的生理变化, 以尽快建立更高效的渗透调节机制, 还包括鱼体自身的生理反应变化, 如体型变长以提高在海水中的游泳能力, 增强自身血红蛋白的携氧能力等^[3]。

Cristina 和 Amalla^[4], Jørgensen^[5]等指出, 早熟个体在种群中优先快速生长, 抑制了性腺的发育。这可能是种群的生活习性^[6-7]。不同规格、生长速率和能量储存决定了鱼的银化效果和性成熟^[8]。Thorpe^[9]等研究表明, 鱼体银化后, 性腺发育受抑制, 银化前的鱼体规格对银化后的生长也有明显影响, 最终会延迟性成熟。Kristinsson^[10]也发现, 鱼体在完成银化后的第一个春天, 性腺才开始逐渐发育成熟。因此, 确定鱼体开始银化过程的初始规格对后期鱼的生长、性腺发育等都具有重要的意义。

光作为可高效利用的生态因子, 对鱼类的摄食、代谢、生殖、内分泌等生理机能起重要的触发作用^[11]。光

收稿日期: 2015-09-16 修订日期: 2015-12-11

基金项目: 江苏省重点研发计划 (BE2015325); 国家科技支撑计划课题 (2014BAD08B09, 2011BAD13B04); 青岛市创新创业人才计划项目 (13-CX-16)

作者简介: 张 墨, 男 (汉族), 天津人, 研究方向为养殖生态学研究。青岛 中国科学院海洋研究所, 266071。Email: 575839558@qq.com

*通信作者: 刘 鹰, 男 (汉族), 研究员, 研究方向水产工程及生态学。青岛 中国科学院海洋研究所, 266071。Email: yinliu@qdio.ac.cn。中国农业工程学会会员: 刘 鹰 (E041200401S)

周期的变化也影响大西洋鲑的银化生理^[12-13]。随着半导体技术的发展,开发了各种波长和功率的 LED 封装芯片广泛应用于各行业。Endal 等^[14]探讨了增加额外光照对网箱中大西洋鲑生长和性成熟的影响。结果显示,冬、春季在自然光照条件下额外增加光照可以促进大西洋鲑的生长。Duncan 等^[15]研究了不同光周期对大西洋鲑生长和性成熟的影响,结果表明连续光照组和 L:D=9:15 组分别具有最大和最小的体增质量。探究有效光照模式,对提高大西洋鲑银化成功率、抑制性腺发育等具有重要的借鉴意义。

在人工养殖条件下,采取升温或调节光照周期的方法可以使鱼体尽快进入银化期,且银化之后鱼体的规格更大,但是耐盐性较低^[16]。光周期是调控整个幼鲑-降海鲑转变过程中最重要的环境刺激因子,光照可被视为调节幼鲑的大小(加快或延迟生长)和控制发育速度的因素。在自然光周期调控下,大西洋鲑会出现降海变态过程所特有的外部特征(如非降海鲑体表会呈现银色光泽),但可能总体上缺乏同步性(如外部形态特征的改变但对盐度的适应性未改变)^[17]。通过人工调控光照,其目的是在养殖过程中使银化过程更加易于控制,提高降海后的成活率。养殖生产中通常采用这种方法,并且认为规格不同的大西洋鲑鱼具备不同的渗透调节功能。

本研究旨在探讨循环水条件下不同规格大西洋鲑银化过程中的生长差异,及其相应生理变化,以期查明适宜开始银化的鱼体规格及其生理应答机制,为大西洋鲑的健康、可持续和福利化养殖提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大西洋鲑来自山东省东方海洋科技股份有限公司,试验在该公司牟平分公司进行。试验鱼规格较整齐,体质健壮,无病无伤,饲养于封闭式循环水养殖系统中。试验用水为地下井水,水质无污染,经曝气降温后使用。

循环水养殖系统中的养殖池为四边形,底面积 16 m²,池高 2 m,有效水深为 1.5 m。每个养殖池的水体积为 24 000 L,进水沿池壁侧向射流,以液体流量计和电脑中心系统控制进水量,监测水体的溶氧量。通过池中心的排污管排水。鱼种放养前将池水排至 5 cm 深,用 15 mg/L 的次氯酸溶液全池泼洒,清水冲洗后 24 h 使用。利用机械过滤、生物过滤去除养殖系统水体中的残饵、粪便以及 NH₃-N 和 NO₂-N 等有害物质,再经杀菌消毒增氧、去除 CO₂ 调温后输回养殖池。

试验鱼入池后的前 3 d 不投喂,3 d 后每天 07:00 和 15:00 投喂 2 次配合饲料。日投喂量为鱼体质量的 1%,投喂程度为大部分鱼抢食行为减慢、食饱散开,并记录每次投喂量。每次投喂 30 min 后,收集残饵和粪便,记录残饵量。试验用挪威的适可添牌(Skretting)鲑鱼颗粒饲料,其主要营养成分为:粗蛋白≥48.0%,粗脂肪≥18.0%,粗纤维≤1.0%,粗灰分≤12.0%。

1.2 试验方法

试验鱼平均体质量分别为(30.25±2.12)、

(24.27g±1.59)和(18.05±2.46) g,密度为 20 kg/m³,用 SW1、SW2 和 SW3 表示,每个试验组设 3 个重复。养殖试验历时 94 d。鱼种放入池后先暂养 10 d。试验开始后,1~42 d(6 周)采用 12L:12D 的光照周期;43~84 d(6 周)采用全光照(24L:0D)。每隔 14 d 采样 1 次,共采样 6 次。每次选取 100 尾鱼,测量体长和体质量。

每日使用便携式多参数水质测量仪(YSI556MPS)测定水中溶解氧、pH 值、水温等指标。每隔 3 d 采用纳氏试剂比色法测定水体的氨氮浓度,用盐酸萘乙二胺分光光度法测定亚硝酸盐浓度。

各处理组鱼停食 12 h 后,随机取 10 尾,快速放入含有 MS-222(200 mg/L)的水桶中进行麻醉。麻醉后,在大西洋鲑尾静脉用 1 mL 无菌一次性注射器抽血。血样室温放置,分层后,用 4℃离心机在 12 000 r/min 的转速下,离心 10 min 后,将血清转入离心管中,密封于-80℃保存备用。血液生理指标和血清生化指标分别采用深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司的 BC-1800 全自动血液细胞分析仪和 BS-180 全自动生化分析仪测定。试验结束时计算了下列指标:

$$\text{肥满度 (condition factor, CF)} = W/L^3 \times 100; \quad (1)$$

$$\text{日增质量 (daily weight gain, DWG)} = (W_2 - W_1)/(t_2 - t_1); \quad (2)$$

$$\text{特定生长率 (SGR)} = 100 \times (\ln W_2 - \ln W_1)/(t_2 - t_1); \quad (3)$$

$$\text{摄食率 (food intake, FI)} =$$

$$100 \times F/[0.5 \times (W_2 + W_1) \times (t_2 - t_1)]; \quad (4)$$

$$\text{饲料系数 (food conversion ratio, FCR)} =$$

$$F/[n \times (W_2 - W_1)]; \quad (5)$$

$$\text{饲料转化效率 (food conversion efficiency, FCE)} =$$

$$100 \times (W_2 - W_1)/F; \quad (6)$$

$$\text{体质量变异系数 (coefficient of body}$$

$$\text{weight variation, CV)} = SD/X \times 100; \quad (7)$$

$$\text{体长变异系数 (coefficient of body}$$

$$\text{length variation, CV)} = SD/L \times 100; \quad (8)$$

$$\text{净增质量 (net yield, NY)} = (W_2/n - W_1/n)/(t_2 - t_1); \quad (9)$$

式中 SD 为标准差; F 为食物总摄入量, g; t_1 与 t_2 为时间, d; W_1 和 W_2 为 t_1 与 t_2 时的平均体质量, g; s 为养殖池面积, m²; L 为体长, cm; n 为试验鱼尾数; X 是试验鱼平均体质量, g。

1.3 数据处理

试验结果用平均值±标准误(Mean±SE)来表示,并且要进行对数转换从而满足方差齐次性检验和标准正态分布。试验数据用 SPSS17.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并用 Duncan 进行多重比较分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 试验结果

2.1 各试验池的水质指标

本试验中水温、溶解氧浓度、pH 值等均处于大西洋鲑适宜的养殖环境条件下。各处理组间水中氨氮、亚硝酸盐浓度没有显著性差异($P > 0.05$),均在大西洋鲑生长的安全范围之内(表 1)。

表 1 水质参数的变化
Table 1 Changes in water quality parameters in water

水质参数 Parameters	放养规格 Stocking sizes/g		
	SW1 (30.25±2.12)	SW2 (24.27±1.59)	SW3 (18.05±2.46)
水温 Temperature/°C	13.72 ± 0.03a	13.15 ± 0.04a	13.55 ± 0.06a
溶解氧 Dissolved oxygen/(mg·L ⁻¹)	8.58 ± 0.51a	8.62 ± 0.91a	8.55 ± 0.45a
pH 值 pH value	7.58 ± 0.50a	7.57 ± 0.41a	7.49 ± 0.23a
氨氮 Ammonia/(mg·L ⁻¹)	0.014 ± 0.001a	0.015 ± 0.002a	0.014 ± 0.001a
亚硝酸盐 Nitrite/(mg·L ⁻¹)	0.005 ± 0.001a	0.004 ± 0.001a	0.005 ± 0.001a

注: 同一行中上方标有不同字母的平均值表示组间有显著性差异 ($P < 0.05$), 相同则无显著性差异 ($P > 0.05$), 下同。

Notes: The mean with different letters in the same line denote significant differences ($P < 0.05$); the mean with same letters in the same line show no significant differences ($P > 0.05$). Same as below.

2.2 各试验组中鱼的生长性状

不同处理组大西洋鲑的肥满度为 0.64~0.85 (表 2), SW2 组肥满度最高 (0.85)。如表 2 所示, 各组大西洋鲑的日增质量、饲料转化率、饲料系数、摄食率和净增质量均有显著差异 ($P < 0.05$), 其中 SW2 组日增质量、饲料转化率、摄食率和净增质量值最大。而 SW3 组饲料系数则显著高于其他组 ($P < 0.05$)。

表 2 不同规格大西洋鲑的生长指标

Table 2 Growth indices of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in different sizes

生长指标 Growth indices	放养规格 Stocking sizes/g		
	SW1 (30.25±2.12)	SW2 (24.27±1.59)	SW3 (18.05±2.46)
日增质量 Daily weight gain, DWG/(g·d ⁻¹)	0.46±0.07b	0.62±0.09a	0.32±0.05c
肥满度 Condition factor, CF	0.73±0.12b	0.85±0.36a	0.64±0.73c
饲料转化率 Food conversion efficiency, FCE/%	70.38±6.67b	84.17±5.76a	65.14±4.75b
饲料系数 Food conversion ratio, FCR	1.23±0.34b	1.29±0.53b	1.54±0.35a
摄食率 Food intake, FI/%	0.63±0.11b	0.75±0.16a	0.37±0.07b
净增质量 Net yield NY/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	4.36±0.03b	5.36±0.05a	4.75±0.02b

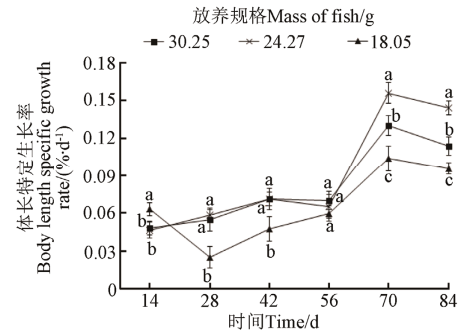
Note: $n=4$.

从图 1a 可知, SW3 组的体长特定增长率一直显著低于其他组 ($P < 0.05$), 说明该组大西洋鲑银化时间过早, 鱼体未呈现银化期该有的增长, 当前 6 周光照期 (12L:12D) 结束后改为后 6 周的全光照时, 3 个处理组大西洋鲑体长均有显著增长, 但 SW2 组显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。

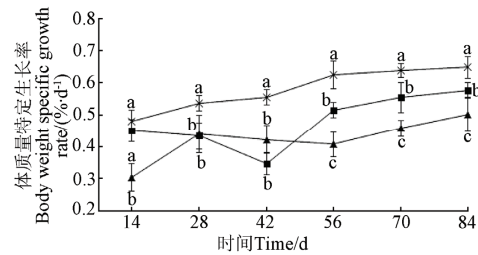
SW3 组的体质量特定增长率增长缓慢 (图 1b), 在 56 d 后体质量特定增长率显著低于其他组 ($P < 0.05$), 说明该组大西洋鲑银化时间过早, 在改为全光照条件下后, 鱼体不适当当前的光照条件。在第 56 天时 SW1、SW2 组的光照条件变为全光照后, 试验鱼体质量特定增长率升高, 说明此时银化过程发生, 鱼体生理结构发生改变, 生长加快, 3 个处理组体质量均有显著增长, SW2 组显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。

如图 1c 所示, 前 6 周 (12L:12D) 不同处理组大西洋鲑体长变异系数变化差异不显著 ($P > 0.05$), 后 6 周全光照时, SW1、SW2 组体长变异系数显著增加, SW1 组显著高于其他组 ($P < 0.05$)。SW3 处理组体长变异系数则显著降低 ($P < 0.05$)。

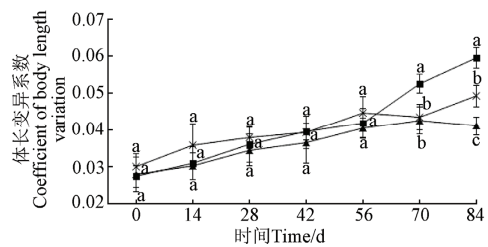
SW3 组的大西洋鲑体质量变异系数变化较大 (图 1d, $P < 0.05$)。前 6 周光照期为 12L:12D 时, SW1、SW2 两组体质量变异系数差异不显著 ($P > 0.05$), 后 6 周改为全光照, 3 个处理组体质量变异系数差异减小。但在 84 d 时, SW3 组体质量变异系数显著高于其他组 ($P < 0.05$)。



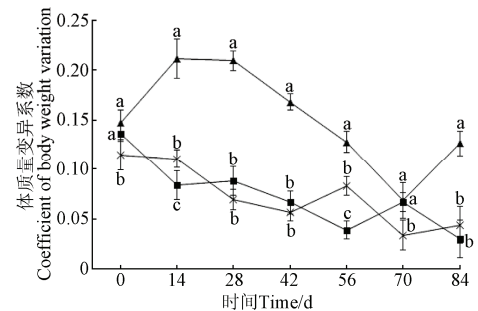
a. 体长特定增长率
a. Body length specific growth rate



b. 体质量特定增长率
b. Body weight specific growth rate



c. 体长变异系数
c. Variation coefficient of body length



d. 体质量变异系数
d. Variation coefficient of body weight

图 1 不同规格大西洋鲑的生长性状

Fig.1 Growth traits of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in different sizes

2.3 各试验组中鱼的血液学指标

银化结束后, SW3 组血液白细胞、淋巴细胞和中性粒细胞数目最高, 但各处理组间差异不显著 ($P>0.05$); SW1 组鱼血红蛋白浓度最高, 随养殖规格的下降而降低, 各处理组间差异显著 ($P<0.05$)。SW1 和 SW2 组中红细胞数目差异不显著 ($P>0.05$), SW3 组中则显著低于 SW1 和 SW2 组 ($P<0.05$)。随着各组鱼体规格的减小, 血栓细胞的数目反而增加, 各处理组间差异显著 ($P<0.05$), SW3 组明显高于其他组。

表 3 不同规格大西洋鲑银化过程中血液学指标的变化($n=4$)

Table 3 Changes of hematological indices for different size Atlantic salmon *Salmo salar* L. in smoltification

血液指标 Hematological indices	放养规格 Stocking sizes/g		
	SW1 (30.25±2.12)	SW2 (24.27±1.59)	SW3 (18.05±2.46)
白细胞数目 White blood cell count, WBC/($10^9 \cdot L^{-1}$)	318.62±8.24a	323.75±6.15a	329.03±8.39a
淋巴细胞数目 Lymphocyte count, LYMP/($10^9 \cdot L^{-1}$)	104.63±2.18a	108.37±2.54a	110.04±4.36a
血红蛋白浓度 Hemoglobin concentration, HGB/($g \cdot L^{-1}$)	119.46±0.77a	108.41±1.43b	98.41±0.89c
红细胞数目 Red blood cell count, RBC/($10^{12} \cdot L^{-1}$)	0.57±0.04a	0.54±0.08a	0.45±0.07b
血栓细胞数目 ThromboCyte count/($10^9 \cdot L^{-1}$)	311.13±5.77c	337.86±2.45b	349.27±4.47a
中性粒细胞数目 Neutrophil count/($10^9 \cdot L^{-1}$)	95.02±2.67a	97.48±4.56a	98.84±5.33a

2.4 各试验组鱼血清中的生化指标

银化结束后, SW2 组大西洋鲑血清中总蛋白和白蛋白浓度最高, 各处理组中蛋白浓度差异显著 (表 4, $P<0.05$)。

表 4 不同规格大西洋鲑银化过程中血清生化指标的变化($n=4$)

Table 4 Changes of plasma biochemical indices for different size Atlantic salmon *Salmo salar* in smoltification

血液生化指标 Plasma biochemical indices	放养规格 Stocking sizes/g		
	SW1 (30.25±2.12)	SW2 (24.27±1.59)	SW3 (18.05±2.46)
总蛋白 Total serum protein, TP/($g \cdot L^{-1}$)	49.15±2.67a	56.23±1.38b	40.12±2.55c
白蛋白 Albumin, ALB/($g \cdot L^{-1}$)	6.97±0.18a	7.78±0.22b	6.02±0.36c
总胆红素 Total bilirubin, T-Bil/($\mu mol \cdot L^{-1}$)	10.42±0.67a	10.55±0.57a	11.87±0.97b
尿酸 Uric acid, UA/($mmol \cdot L^{-1}$)	47.63 ± 0.33a	50.45±0.75a	43.26±0.98b
尿素 Urea, UREA/($mmol \cdot L^{-1}$)	5.34±0.37a	5.56±0.58a	5.11±0.83b
葡萄糖 Glucose, Glu/($mmol \cdot L^{-1}$)	4.65±0.19a	4.92±0.74a	4.88±0.83a
总胆固醇 Total cholesterol, TC/($mmol \cdot L^{-1}$)	3.57±0.58a	3.02±0.97b	2.64±0.34c
甘油三酯 Triglyceride, TG/($mmol \cdot L^{-1}$)	3.05±0.47a	2.44±0.34b	1.89±0.85c
肌酸激酶 Creatine kinase, CK/($mmol \cdot L^{-1}$)	537.84±9.36a	532.73±6.48a	540.37±9.94a

血清中的总胆固醇、甘油三酯浓度随鱼体规格增大而升高, 各组间有显著性差异, 表现为: SW1>SW2>SW3 ($P<0.05$)。各组间大西洋鲑血清中葡萄糖浓度没有显著性差异 ($P>0.05$); SW2 组代谢产物尿酸、尿素浓度最高, SW1、SW2 组的浓度均显著大于 SW3 组 ($P<0.05$), 但 SW1、SW2 组间没有显著差异 ($P>0.05$)。SW3 组大西洋鲑血清中总胆红素显著高于其他 2 组 ($P<0.05$), SW3 组肌酸激酶浓度最高, 但各组间没有显著性差异 ($P>0.05$)。

3 讨论

生理生化指标是评价大西洋鲑与其生活环境之间关系的重要标准。相应生理生化指标的变化影响着大西洋鲑在银化期间的身体结构和外部形态, 以不断适应外界环境的变化。面对周围环境变化, 鱼类需要一定的时间去适应, 在这段时间内, 同样也会改变自身的生理代谢状况以及对营养的摄取吸收和利用^[18]。通常用血液学指标来评价鱼体在毒理学、生理学和病理学等条件下的福利健康状况^[19], 作为评价机体对环境适应性的指标^[20]。

3.1 银化规格对大西洋鲑血液指标的影响

由于鱼体的银化起始规格不同, 其血液学和生理学指标可能会有很大差异。在显微镜下看到, 血细胞体积比较大、数量比较少, 主要作用是吞噬细菌、防御疾病^[21]。本试验结束时, 各组间大西洋鲑血液中白细胞数目、淋巴细胞和中性粒细胞数目差异不显著, 表明鱼体健康。银化规格最大的处理组中鱼的红细胞数目和血红蛋白浓度最大。随着银化光照条件改变, 鱼体外形发生变化, 直至银化过程结束时, 生长快速的大西洋鲑血液中, 红细胞数目最多, 血红蛋白浓度最高, 表明鱼体的对环境的适应能力较快, 游泳能力较强, 血液运输氧气效率高, 能够为维持基本生理活动提供保障^[22]。现有研究表明, 养殖规格与血红蛋白浓度呈正相关^[23-24]。当血红蛋白浓度上升时, 红细胞数目增加, 红细胞内的血红蛋白更易与氧结合, 使运送到各个组织的氧含量增加, 满足了鱼体不断增大对能量的需求^[25]。当光照条件改为全光照时, 银化作用加强, 鱼体的生理节律改变, 活动能力加强, 鱼体规格越大体内红细胞数目越多, 血红蛋白浓度也就越高, 因此, 体质量高的处理组, 鱼体对造血原料需求增大, 营养物质摄入量增大, 呼吸作用加快, 鱼体生长速率升高, 使外形发生“银化”的鱼数目较另外 2 个处理组多。

3.2 银化规格对大西洋鲑生化指标的影响

血清总蛋白 (total serum protein, TP) 主要作用维持血浆平衡, 提供能量、运送营养、促进凝血等^[26]; 是由白蛋白、球蛋白、纤维蛋白原和凝血酶原等各种蛋白构成的复杂混合物。该指标通常用于检测鱼体是否患有疾病, 营养摄入情况和环境潜在致病因子等^[27]。白蛋白 (albumin, ALB) 是最重要的特异性蛋白, 其主要作用是维持血浆胶体渗透压稳定、运输难溶性的小分子有机物和无机离子、提供营养等^[28]。试验中随着鱼体质量的增大, 各处理组大西洋鲑血液总蛋白和白蛋白之间差异

显著, 说明 SW2 组鱼体的抵抗能力高, 蛋白消耗量少。在外部环境条件一致的情况下, 鱼体有机成分的分解和合成代谢的动态平衡被打破, 各处理组间蛋白含量差异显著。在血液中, 本属于肌细胞内的肌酸激酶(creatin kinase, CK) 浓度升高, 表示机体已有或正发生肌肉损伤^[29]。本试验中, SW3 组 CK 浓度显著高于其他组, 说明在相同的光照条件下, 规格小的大西洋鲑容易发生肌肉损伤, 不适于较早开始银化。

当鱼体处于不利的生活条件并诱发病变时, 血浆中的总胆红素含量上升, 导致肝脏损伤^[30]。本试验中, SW3 总胆红素变化较 SW1、SW2 组明显, 说明银化过程中 SW3 组鱼体自身的生理变化可能导致了肝脏损伤, 因此该处理组过早开始银化可能对鱼体产生损害。尿素和尿酸是鱼类体内蛋白质代谢分解的主要含氮终产物, 常用其来评估鱼体肾脏的健康程度。同样, 尿素还可以直接透过毛细血管进入血液, 尿酸和尿素还有可能来自于饲料^[31]。SW2 处理组尿素浓度最高, 一部分来源于鱼体自身的排泄, 另一部分可能是由饲料中摄取的尿素溶于血液, 使其在银化过程中尿酸和尿素在血液中的浓度升高。

银化过程中, 鱼体外部形态发生改变, 代谢机能也发生改变^[32]。在鱼体代谢过程中, 为了满足日常的能量消耗, 鱼体通过利用自身储存的能量物质维持正常的生理活动^[33]。此时, 鱼体内蛋白质、脂肪、糖类有机物的总量减少, 而水分和无机物的含量相对增加, 因此鱼体内各成分相对含量在一定时间内常发生变化^[34-35]。有研究表明, 在环境胁迫下, 某一特定因素的变化可能导致鱼体大量耗能, 使蛋白质等有机物的含量下降, 但水分的相对含量上升^[36]。蛋白质、脂肪、糖类等重要的能量物质通过分解作用, 以血细胞为载体将有机物质所产生的能量输送到鱼体各个组织, 利于各组织内物质循环和能量流动^[37]。本研究中, 各组大西洋鲑血清中葡萄糖的浓度差异不显著, 表明各试验组大西洋鲑对葡萄糖利用率均较低, 葡萄糖并不是能量代谢的首要底物。而随着鱼体增大, 银化过程中规格大的处理组鱼体血清总蛋白浓度相对较高, 各组间差异显著。这表明鱼体积累足够蛋白质以维持正常生理活动, 此时蛋白质可能作为保证鱼体基本代谢活动的主要底物。同时, 脂肪是鱼体重要的储能物质, 需要在体内先完成积累的过程, 因此, 在蛋白消耗一段时间后, 才可能消耗体内积累的脂肪。这也说明此时鱼体的新陈代谢活动增强, 在应激状态下开始逐渐适应周围环境。三大能量物质中, 鱼类对葡萄糖的利用率较低。当受到生存环境的胁迫时, 鱼体会大量消耗蛋白质^[38]。因此, 本研究中 SW3 组蛋白质浓度最低。随着各处理组鱼体质量的下降, 为了确保鱼体基本代谢, 保证体内蛋白、脂类、葡萄糖浓度处于较高的利用水平, 常通过有序地分解体内有机物而完成。鱼体对能量物质的利用顺序依次为蛋白质、脂肪、糖类。

4 结 论

放养规格是影响银化期的大西洋鲑鱼生长性状和生理指标变化的重要因素:

1) 经过银化期之后, SW2 组大西洋鲑的肥满度、日增质量、饲料转化率、净增质量最高, 与其他组差异显著 ($P < 0.05$)。SW2 组体质量、体长特定生长率最高。各组间体质量、体长变异系数差异显著 ($P < 0.05$)。

2) 随着养殖规格的增大, 血红蛋白浓度升高, 红细胞数目增加, 说明鱼体需氧量增加。试验结束时, SW3 组白细胞数目、淋巴细胞数目和中性粒细胞数目最高, 表明鱼体抗病能力强。红细胞数目、血红蛋白浓度 SW2 组最高, 说明该组鱼体游泳能力强, 血液与氧结合能力高, 呼吸作用加快, 生长速率增加。

3) SW2 组总蛋白、白蛋白、尿素含量最高, 且各规格组间差异显著 ($P < 0.05$)。总胆固醇、甘油三酯浓度均随鱼体规格增大而增加 ($P < 0.05$), 表明大西洋鲑血液和体内对能量的利用增强。各规格组间葡萄糖浓度差异不显著 ($P > 0.05$), 表明鱼体对葡萄糖的利用率较低。

总之, 在养殖生产过程中, 体质量过低 ($(18.05 \pm 2.46) \text{ g}$) 或较高 ($(30.25 \pm 2.12) \text{ g}$) 的大西洋鲑均不适宜开始银化过程, 容易导致鱼体发育不良, 生长变缓。因此, 选择规格为 $(24.27 \pm 1.59) \text{ g}$ 的大西洋鲑开始银化, 可显著提高鱼体生长速率和银化成功率, 减少病害发生频率和畸形率, 对降低成本、增加单位水体养殖产量和苗种的规模化生产培育具有重要的意义。

[参 考 文 献]

- [1] Handeland S O, Imsland A K, Björnsson B T, et al. Physiology during smoltification in Atlantic salmon: Effect of melatonin implants[J]. *Fish Physiol Biochem*, 2013, 39(5): 1079—1088.
- [2] Sundh H, Nilsen T O, Lindström J, et al. Development of intestinal ion-transporting mechanisms during smoltification and seawater acclimation in Atlantic salmon *Salmo salar*[J]. *J Fish Biol*, 2014, 85(4): 1227—1252.
- [3] Nilsen T O, Ebbesson L O E, Madsen S S, et al. Differential expression of gill Na^+ , K^+ -ATPase α - and β -subunits, and Na^+ , K^+ , 2Cl^- cotransporter in smolting anadromous and landlocked strains of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *J Exp Biol*, 2007, 210(Pt 16): 2885—2896.
- [4] Cristina E T, Amalla E M. Physiological effects of crowding in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), selected for low and high stress responsiveness[J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1/2/3/4): 583—593.
- [5] Jørgensen E H, Hansenc Ø A, Moriyama S, et al. The parr-smolt transformation of Arctic charr is comparable to that of Atlantic salmon[J]. *Aquaculture*, 2007, 273(2/3): 227—234.
- [6] Valiente A G, Juanes E. Reproductive strategies explain genetic diversity in Atlantic salmon, *Salmo salar*[J]. *Environ Biol Fish*, 2005, 74(3/4): 323—334.
- [7] Fjellidal P G, Hansen T, Huang T S. Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture*, 2011, 321(1/2): 93—100.
- [8] Porter M J R, Duncan N J, Mitchell D, et al. The use of cage lighting to reduce plasma melatonin in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effects on the inhibition of grilising[J]. *Aquaculture*, 1999, 176(3/4): 237—244.
- [9] Thorpe J E, Talbot C, Miles M S, et al. Control of maturation in cultured Atlantic salmon, *Salmo salar*, in pumped seawater tanks, by restricting food intake[J]. *Aquaculture*, 1990, 86(2/3): 315—326.

- [10] Kristinsson J B, Saunders R L, Wiggs A J. Growth dynamics during the development of bimodal length -frequency distribution in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. Aquaculture, 1985, 45(1/2/3/4): 1—20.
- [11] Fyhn U E H, Clarke W C, Withler R E. Hemoglobins in smoltifying Chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha*, subjected to photoperiod control[J]. Aquaculture, 1991, 95(3/4): 359—372.
- [12] Handeland S O, Stefansson S O. Photoperiod control and influence of body size on off-season parr-smolt transformation and post-smolt growth[J]. Aquaculture, 2001, 192(2/3/4): 291—307.
- [13] Handeland S O, Björnsson B T, Stefansson S O. Seawater adaptation and growth of post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) of wild and farmed strains[J]. Aquaculture, 2003, 220(1/2/3/4): 367—384.
- [14] Endal H P, Taranger G L, Stefansson S O, et al. Effects of continuous additional light on growth and sexual maturity in Atlantic salmon, *Salmo salar*, reared in sea cages[J]. Aquaculture, 2000, 191(4): 337—349.
- [15] Duncan N, Mitchell D, Bromage N. Post-smolt growth and maturation of out-of-season 0+ Atlantic salmon (*Salmo salar*) reared under different photoperiods[J]. Aquaculture, 1999, 177(1/2/3/4): 61—71.
- [16] Shimomura T, Nakajima T, Horikoshi M, et al. Relationships between gill Na⁺,K⁺-ATPase activity and endocrine and local insulin-like growth factor-I levels during smoltification of masu salmon (*Oncorhynchus masou*)[J]. Gen Comp Endocr, 2012, 178(2): 427—435.
- [17] Dickhoff W W, Beckman B R, Larsen D A, et al. The role of growth in endocrine regulation of salmon smoltification[J]. Fish Physiol Biochem, 1997, 17(1/2/3/4/5/6): 231—236.
- [18] 邵邻相, 谢炜, 叶菲菲. 养殖密度对地图鱼幼鱼生长发育的影响[J]. 水产科学, 2005, 24(4): 7-9.
- [19] Shao Linxiang, Xie Wei, Ye Feifei. Effect of Stocking Density on Growth of Juvenile *Astronotus ocellatus*[J]. Fisheries Science, 2005, 24(4): 7—9. (in Chinese with English abstract)
- [20] Oppedal F, Berg A, Olsen R E, et al. Photoperiod in seawater influence seasonal growth and chemical composition in autumn sea-transferred Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) given two vaccines[J]. Aquaculture, 2006, 254(1/2/3/4): 396—410.
- [21] 钱云霞, 陈惠群, 孙江飞. 饥饿对养殖鲈鱼血液生理生化指标的影响[J]. 中国水产科学, 2002, 9(2): 134—137.
Qian Yunxia, Chen Huiqun, Sun Jiangfei. Effects of starvation on hematological and blood biochemical indices in cultured *Lateolabrax japonicus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2002, 9(2): 134—137. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周玉, 郭文场, 杨振国, 等. 鱼类血液学指标研究的进展[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(2): 163—165.
Zhou Yu, Guo Wenyang, Yang Zhenguo, et al. Advances in the study of haematological indices of fish[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(2): 163—165. (in Chinese with English abstract)
- [23] Ruyet J P, Lames A, Roux A L, et al. Long-term ammonia exposure of turbot: effects on plasma parameters[J]. J Fish Biol, 2003, 62(4): 879—894.
- [24] Mazur C F, Iwama G K. Effect of handling and stocking density on hematocrit plasma cortisol, and survival in wild and hatchery-reared Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. Aquaculture, 1993, 112(4): 291—299.
- [25] Cristina E T, Amalla E M. Physiological effects of crowding in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), selected for low and high stress responsiveness[J]. Aquaculture, 2006, 258(1/2/3/4): 583—593.
- [26] Fivelstad S, Waagbø R, Stefansson S, et al. Impacts of elevated water carbon dioxide partial pressure at two temperatures on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr growth and haematology[J]. Aquaculture, 2007, 269(1/2/3/4): 241—249.
- [27] 陈晓耘. 饥饿对南方鲈幼鱼血液的影响[J]. 西南农业大学学报, 2000, 22(2): 167—177.
Chen Xiaoyun. Effect of starvation on the blood of southern catfish (*Silurus Meridionalis* Chen)[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2000, 22(2): 167—177. (in Chinese with English abstract)
- [28] Tocher D R, Bendiksen E Å, Campbell P J, et al. The role of phospholipids in nutrition and metabolism of teleost fish[J]. Aquaculture, 2008, 280(1/2/3/4): 21—34.
- [29] Wuenschel M J, Jugovich A R, Hare J A. Metabolic response of juvenile gray snapper (*Lutjanus griseus*) to temperature and salinity: Physiological cost of different environments[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2005, 321(2): 145—154.
- [30] Řehulka J, Minařík B, Řehulková E. Red blood cell indices of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) in aquaculture[J]. Aquac Res, 2004, 35(6): 529—546.
- [31] Skov P V, Larsen B K, Frisk M, et al. Effects of rearing density and water current on the respiratory physiology and haematology in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* at high temperature[J]. Aquaculture, 2011, 319(3/4): 446—452.
- [32] Wilkie M P. Ammonia excretion and urea handling by fish gills: present understanding and future research challenges[J]. J Exp Zool, 2002, 293(3): 284—301.
- [33] 张曦文, 吴垠, 贺茹靖, 等. 循环水养殖模式下养殖密度对青石斑鱼生长及生理指标的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(6): 518—522.
Zhang Xiwen, Wu Yin, He Rujing, et al. The effects of stocking density on growth and physiological indices of grouper *Epinephelus awoara* in recirculating aquaculture[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(6): 518—522. (in Chinese with English abstract)
- [34] 聂芬, 石小涛, 李大鹏, 等. 拥挤胁迫对史氏鲟稚鱼血浆溶菌酶活性和补体水平的影响[J]. 水生生物学报, 2007, 31(4): 581—584.
Nie Fen, Shi Xiaotao, Li Dapeng, et al. The effect of crowding stress on plasma lysozyme activity and complement levels of juveniles amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(4): 581—584. (in Chinese with English abstract)
- [35] Auferin B, Geslin M. Plasma cortisol response to stress in juvenile rainbow trout is influenced by their life history during early development and by egg cortisol content[J]. Gen Comp Endocr, 2008, 158(3): 234—239.
- [36] Shearer K, Parkins P, Gadberry B, et al. Effects of growth rate/body size and a low lipid diet on the incidence of early sexual maturation in juvenile male spring Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. Aquaculture, 2006, 252(2/3/4): 545—556.
- [37] McConnachie S H, Cook K V, Patterson D A, et al. Consequences of acute stress and cortisol manipulation on the physiology, behavior, and reproductive outcome of female Pacific salmon on spawning grounds[J]. Horm Behav, 2012, 62(1): 67—76.
- [38] Vijayan M M, Leatherland J F. High stocking density affects cortisol secretion and tissue distribution in brook charr, *Salvelinus fontinalis*[J]. J Endocrinol, 1990, 124(2): 311—318.
- [39] 高露姣, 陈立桥, 宋兵. 饥饿和补偿生长对史氏鲟幼鱼摄食、生长和体成分的影响[J]. 水产学报, 2004, 28(3): 279—284.
Gao Lujiao, Chen Liqiao, Song Bing. Effect of starvation and compensatory growth on feeding, growth and body biochemical composition in *Acipenser schrenckii* juveniles[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(3): 279—284. (in Chinese with English abstract)

Effect of different sizes on growth during smoltification in atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and its mechanism of physiological response

Zhang Mo¹, Gao Xiaolong^{1,2}, Li Xian¹, Qu Shancun³, Liu Ying^{1,4*}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shandong Oriental Ocean Sci-tech Co., Ltd, Yantai 264003, China;

4. Nantong R&D Center of Marine Science and Technology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Nantong 226019, China)

Abstract: Atlantic salmon *Salmo salar* L. juveniles with various initial body weight of (30.25±2.12) g (SW1 group), (24.27±1.59)g (SW2 group), (18.05±2.46)g (SW3 group) were reared in a recirculating system under a photoperiod of 12:12 light: dark in 1-42 days and 24 light: 00 dark in 43-84 days to evaluate the effects of size on growth performance and mechanism of physiological response during smoltification. The results showed that the maximal condition factor, daily weight gain, food conversion efficiency, and net yield were found in SW2, with significant difference in different experimental groups ($P<0.05$). There were significantly higher special growth rate in body length and body weight in SW2 than in other groups ($P<0.05$); and there were significant differences in coefficient of body length and body weight variation among the three groups ($P<0.05$). The CV of body length of *S. salar* in the different groups did not significantly change in the first 6 weeks of the study. But when the condition was changed to full light the coefficient of variation of body length significantly increased in the SW1 and SW2 groups, and the change was more significant in group SW1 compared to the other groups ($P<0.05$). The CV of body weight of *S. salar* in group SW3 varied greatly over the course of the experiment. Within the first 6-week light cycle (12L:12D), the coefficient of variation of body weight in SW1, SW2 showed insignificant difference ($P>0.05$). After the condition was changed to full light in the last 6 weeks, the coefficient of variation of body weight in 3 groups was narrowly varied. At 84 d, the value in the SW3 group was significantly higher than that in any other group ($P<0.05$). The hemoglobin concentration and the number of red blood cell (RBC) were found to be increased with the increase in size, indicating that the increase demand of oxygen for fish. The maximal white blood cell (WBC), lymphocyte, neutrophils was found in SW3 group, which showed that enhanced their disease-resistant capability. The number of red blood cells did not differ significantly between groups SW1 and SW2 ($P>0.05$), but the value was significantly higher than that in group SW3 ($P<0.05$). The number of thrombocytes fell with the increase of culture size, and the three groups differed significantly ($P<0.05$). The number of neutrophil was close among these groups, and no significant difference was identified ($P>0.05$). The highest values of total protein (TP) and albumin (ALB) appeared in SW2 group, and the difference of three groups were marked ($P<0.05$). The concentration of total cholesterol (TC) and triglycerides (TG) increased with the increase in size ($P<0.05$), which suggested that the enhancement of energy utilization in the blood and body. The concentration of uric acid and carbamide in metabolites was highest in group SW2. Their concentrations in groups SW1 and SW2 did not differ significantly ($P>0.05$), and they were significantly higher than those in group SW3 ($P<0.05$). The concentration of T-Bil in group SW3 was significantly higher than those in the other two groups ($P<0.05$). The concentration of glucose were no significant difference ($P>0.05$), which suggests that utilization rate of glucose by *Salmo salar* L. is lower. The concentration of CK was highest in group SW3, but no significant difference was identified among the three groups ($P>0.05$). So *Salmo salar* L. in 24.27±1.59g should be selected for the smoltification, thereby optimizing the culture condition and increasing the culture yield per water body at lower cost, which can theoretically referenced for the scale aquaculture of *Salmo salar* L. seeds.

Keywords: growth; physiology; biochemistry; *Salmo salar* L.; smoltification; size