

投喂频率对史氏鲟幼鱼生长、抗氧化和免疫指标的影响

管敏, 张德志, 张厚本

(中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443100)

摘要:为探究史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)幼鱼的最低适宜投喂频率, 将实验鱼的投喂频率分别设定为 2、1、0.5、0.25、0.125 次/d, 养殖 56 d 后测定其生长、抗氧化和免疫指标。结果显示, 随着投喂频率降低, 史氏鲟幼鱼的增重率、特定生长率、肝体比和脏体比显著降低($P < 0.05$), 但存活率和肥满度无显著性变化($P > 0.05$)。在抗氧化指标中, 随着投喂频率降低, 肝脏 T-AOC、SOD 活性呈逐渐降低的趋势, 2 次/d 组 T-AOC 活性与 0.5、0.25、0.125 次/d 组均存在显著差异($P < 0.05$), 但各组之间 SOD 活性差异不显著($P > 0.05$); 肝脏 CAT 活性和 GSH 含量呈先升高、后降低的趋势, 0.5、0.25 次/d 组肝脏 CAT 活性显著高于 0.125 次/d 组($P < 0.05$), 1 次/d 组 GSH 含量显著高于 0.5、0.25 和 0.125 次/d 组($P < 0.05$); 肝脏 MDA 含量呈逐渐增加的趋势, 0.5、0.25、0.125 次/d 组 MDA 含量显著高于 2、1 次/d 组($P < 0.05$)。免疫指标中, 随着投喂频率降低, 实验鱼肝脏 LZM 活性逐渐降低, 2 次/d 组与 0.125 次/d 组差异显著($P < 0.05$); 而肝脏 IgM 含量呈先升高、后降低的趋势, 0.25 次/d 组显著高于 2、0.125 次/d 组($P < 0.05$)。综合各项指标, 建议史氏鲟幼鱼的最低适宜投喂频率为 1 次/d, 以避免投喂频率过低对鱼体造成的胁迫氧化损伤。

关键词:史氏鲟幼鱼; 投喂频率; 生长; 抗氧化; 免疫

中图分类号: Q553 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2021)04-0104-07

史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)主要分布于黑龙江、乌苏里江和松花江等地, 因其生长速度快、抗逆性强、肉质鲜美, 具有较高的营养价值和经济价值, 逐渐发展成为我国鲟类养殖的主要品种之一(孙大江等, 2000)。为了最大化实现养殖效益, 史氏鲟的养殖模式多为高密度集约化养殖, 经常出现因投喂不当导致养殖水质恶化, 进而引发鱼病暴发的现象(石小涛, 2006); 良好的养殖管理是史氏鲟高密度健康养殖的有效保证, 而投喂频率则是其养殖管理的关键环节之一(仇登高等, 2018)。

投喂频率过高时, 会造成饲料浪费、饵料系数升高、水质变坏, 进而导致养殖经济效益下降(Guroy et al, 2006; Wang et al, 2007; Aderolu et al, 2010); 而当投喂频率过低时, 会导致鱼类生长缓慢、个体分化大, 对病原体的抵抗力下降(Wang et al, 1998; Xie et al, 2011)。目前, 很多学者从胃排空、生长性能、摄食水平、饵料转化、生理生化等方面研究了鱼类的最高适宜投喂频率(Lee et al, 2000; Sweka et al, 2004; 杜海明等, 2007; 孙存军, 2011; 覃志彪等,

2011; 朱晓芳等, 2017; 仇登高等, 2018), 如大西洋鲑(*Salmo salar*)、花鲈(*Lateolabrax maculatus*)、杂交鲟(*Acipenser schrenckii* ♀ × *A. baeri* ♂)等(Luo et al, 2015; 王伟等, 2018; 刘淑兰等, 2019); 鲜有从抗氧化和免疫角度报道鱼类最低适宜投喂频率方面的研究。本文以史氏鲟幼鱼为实验对象, 通过研究低投喂频率对其生长、抗氧化和免疫指标的影响, 掌握史氏鲟幼鱼的最低适宜投喂频率, 从而为其高密度健康养殖提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验鱼选择及暂养

实验鱼为中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所 2016 年全人工繁殖所得的史氏鲟幼鱼。随机挑选规格一致、体质健康的 7 月龄史氏鲟幼鱼 300 尾, 体重(377.40 ± 13.59) g, 体长(34.15 ± 1.63) cm, 暂养于直径 2.5 m 的养殖池中, 暂养水温 16.8℃, 溶氧 6.0~7.0 mg/L, pH 7.3~7.6, 氨氮 0.01 mg/L, 亚硝酸盐 0.01 mg/L。暂养期间, 各实验组每天投喂 1 次, 投喂量为鱼体重的 2%, 7 d 后开始实验。

1.2 实验设计

实验在直径 2.5 m、水深 0.6 m 的实验池中进行, 投喂频率设置为 2、1、0.5、0.25 和 0.125 次/d, 每

收稿日期: 2019-07-30 修回日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(编号: 51309204)。

作者简介: 管敏, 1988 年生, 男, 工程师, 主要从事长江珍稀特有鱼类物种保护研究。E-mail: guanmin_888@163.com

个投喂频率组设3个平行组,共60尾鱼。实验开始前和结束时,用120 mg/L MS-222将史氏鲟麻醉后称重,并测其全长、体长;实验结束时,每个平行组随机取样15尾。实验期间,水温17.2~19.5℃,溶解氧6.0~7.0 mg/L,pH 7.2~7.6,氨氮<0.1 mg/L,亚硝酸盐<0.05 mg/L;实验持续56 d。

实验投喂的饲料品牌为“统一”鲟鱼配合饲料,饲料成分为鱼粉、面粉、豆粕、鱼油、磷酸二氢钙、维生素A、维生素D₃、维生素E、维生素K₃、维生素B₁、维生素B₂、维生素B₆、维生素B₁₂、烟酰胺、D-泛酸钙、叶酸、肌醇、L-抗坏血酸、氯化胆碱、硫酸铜、硫酸锰、硫酸锌、硫酸亚铁等。

1.3 样品采集和处理

用120 mg/L的MS-222将实验鱼快速麻醉后解剖,取肝脏组织;用预冷的鱼用生理盐水将肝脏冲洗干净,滤纸吸干水分后将其切成小块,并置于2 mL离心管中,经液氮快速冷冻后,置于-70℃保存待测。

1.4 指标测定

1.4.1 生长指标 史氏鲟的成活率(SR)、增重率(WGR,%)、特定生长率(SGR,%/d)、肝体比(HSI,%)、肥满度(CF,%)和脏体比(VSI,%)计算公式如下:

$$SR = 100 \times N_t / N_i \quad ①$$

$$WGR = 100 \times (W_t - W_0) / W_0 \quad ②$$

$$SGR = 100 \times (\ln W_t - \ln W_0) / t \quad ③$$

$$HSI = 100 \times W_h / W_b \quad ④$$

$$CF = 100 \times W_b / L^3 \quad ⑤$$

$$VSI = 100 \times W_e / W_b \quad ⑥$$

表1 投喂频率对史氏鲟幼鱼生长指标的影响

Tab.1 Effects of feeding frequency on growth indices of juvenile *A. schrenckii*

投喂频率/ 次·d ⁻¹	成活率/ %	增重率/ %	特定生长率/ %·d ⁻¹	脏体比/ %	肝体比/ %	肥满度/ %
2	100	104.66±4.84 ^a	1.24±0.14 ^a	9.71±0.84 ^a	3.76±0.44 ^a	0.0078±0.0002
1	100	81.44±3.26 ^b	0.99±0.12 ^b	8.42±0.36 ^b	3.40±0.25 ^a	0.0070±0.0004
0.5	100	45.98±3.18 ^c	0.63±0.11 ^c	5.75±0.38 ^c	2.15±0.20 ^b	0.0050±0.0013
0.25	100	23.28±2.59 ^d	0.35±0.08 ^d	5.15±0.37 ^c	1.62±0.09 ^b	0.0060±0.0001
0.125	100	1.19±0.78 ^e	0.02±0.07 ^e	4.76±0.28 ^c	1.11±0.10 ^c	0.0057±0.0002

注:同列指标不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among the experimental groups ($P < 0.05$).

2.2 抗氧化指标

2.2.1 SOD活性 随着投喂频率的下降,史氏鲟幼鱼肝脏SOD活性呈逐渐降低的趋势(图1)。1、0.5、0.25、0.125次/d组史氏鲟肝脏SOD活性分别为282.34、258.86、254.41、246.72 U/mg,较2次/d组

式中: N_t 为终末鱼尾数; N_i 为初始鱼尾数; W_t 为终末体重(g); W_0 为初始体重(g); t 为实验时间(d); W_b 为每尾鱼体重(g); L 为每尾鱼体长(cm); W_h 为肝脏重量(g); W_e 为内脏团重(g)。

1.4.2 抗氧化和免疫指标 抗氧化指标包括超氧化物歧化酶活性(SOD)、过氧化氢酶活性(CAT)、总抗氧化能力活性(T-AOC)、谷胱甘肽含量(GSH)、丙二醛含量(MDA);免疫指标包括溶菌酶活性(LZM)和免疫球蛋白M含量(IgM)。所有指标的测定采用南京建成生物工程研究所研制的试剂盒,具体方法参见说明书。

1.5 数据统计

实验数据用SPSS16.0和Excel 2016进行统计分析,利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和Duncan's多重比较检验低投喂频率对各项指标影响的显著性,差异显著性以 $P < 0.05$ 为标准,结果以平均值±标准差(Mean±SD)表示。

2 结果

2.1 生长指标

实验表明,投喂频率对史氏鲟幼鱼生长有显著影响(表1)。随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼的增重率和特定生长率显著降低($P < 0.05$),当投喂频率降至0.125次/d时,其生长基本处于停滞状态,增重率和特定生长率分别为1.19%/d和0.02%/d;此外,投喂频率的下降,显著降低了实验鱼的肝体比和脏体比($P < 0.05$),但对鱼体肥满度无显著影响($P > 0.05$);各组实验鱼的成活率均为100%。

分别下降了1.69%、9.86%、11.41%、14.09%,但各组间的差异不显著($P > 0.05$)。

2.2.2 CAT活性 史氏鲟幼鱼肝脏CAT活性变化如图2所示。随着投喂频率的降低,肝脏CAT活性呈先升高、后降低的趋势;其中,0.5次/d组肝

脏 CAT 活性最大,为 31.23 U/mg,分别是 2、1、0.25、0.125 次/d 组的 1.43、1.31、1.10、1.67 倍;0.5、0.25 次/d 组肝脏 CAT 活性显著高于 0.125 次/d 组 ($P < 0.05$),其他各组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

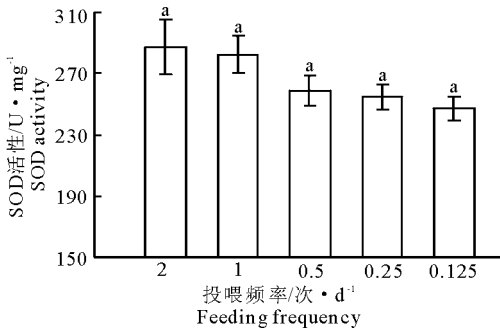


图1 投喂频率对史氏鲟幼鱼 SOD 活性的影响

Fig.1 Effect of feeding frequency on SOD activity of juvenile *A. schrenkii*

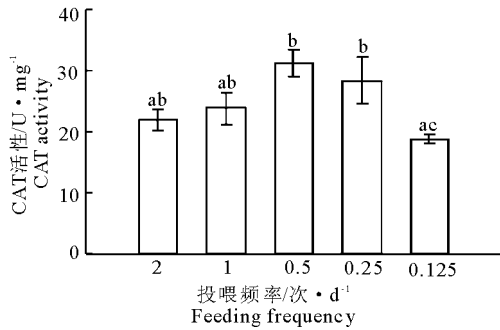


图2 投喂频率对史氏鲟幼鱼 CAT 活性的影响

Fig.2 Effect of feeding frequency on CAT activity of juvenile *A. schrenkii*

2.2.3 GSH 含量 史氏鲟幼鱼肝脏 GSH 含量变化如图 3 所示。各组实验鱼肝脏 GSH 含量高低表现为:1 次/d 组 > 2 次/d 组 > 0.5 次/d 组 > 0.25 次/d 组 > 0.125 次/d 组;其中,1 次/d 组史氏鲟幼鱼肝脏 GSH 含量显著高于 0.5、0.25、0.125 次/d 组 ($P < 0.05$),其他各组之间无差异显著 ($P > 0.05$)。

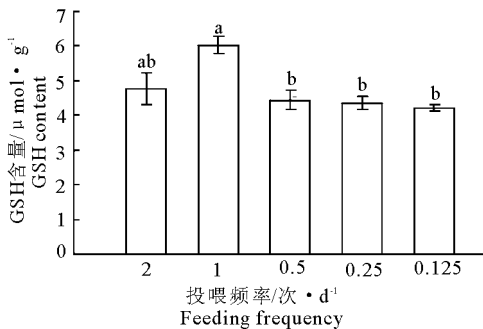


图3 投喂频率对史氏鲟幼鱼 GSH 含量的影响

Fig.3 Effect of feeding frequency on GSH content of juvenile *A. schrenkii*

2.2.4 T-AOC 活性 本次实验表明,随着投喂频率的下降,显著降低了史氏鲟幼鱼肝脏 T-AOC 活性,且投喂频率越低,肝脏 T-AOC 活性下降越明显(图 4)。1、0.5、0.25、0.125 次/d 组肝脏 T-AOC 活性分别为 0.42、0.36、0.33、0.30 U/mg,较 2 次/d 组肝脏 T-AOC 活性分别下降 9.67%、21.42%、27.47%、34.56%,且 2 次/d 组与 0.5、0.25、0.125 次/d 组均存在显著性差异 ($P < 0.05$),其他各组之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

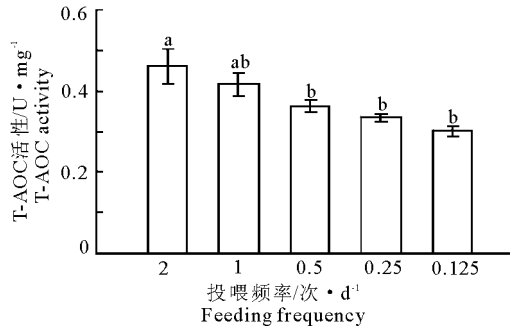


图4 投喂频率对史氏鲟幼鱼 T-AOC 活性的影响

Fig.4 Effect of feeding frequency on T-AOC activity of juvenile *A. schrenkii*

2.2.5 MDA 含量 史氏鲟幼鱼肝脏 MDA 含量在不同投喂频率下的变化见图 5。随着投喂频率的降低,其肝脏 MDA 含量呈逐渐增加的趋势;其中,0.5、0.25、0.125 次/d 组肝脏 MDA 含量显著高于 2、1 次/d 组 ($P < 0.05$)。当投喂频率由 2、1 次/d 降至 0.5 次/d 时,其肝脏 MDA 含量分别由 5.39、5.48 nmol/mg 急增至 9.73 nmol/mg,分别升高了 80.62%、77.44%。

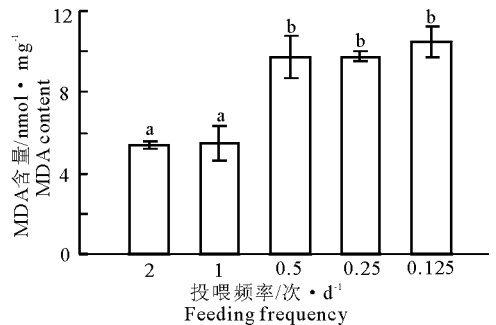


图5 投喂频率对史氏鲟幼鱼 MDA 含量的影响

Fig.5 Effect of feeding frequency on MDA content of juvenile *A. schrenkii*

2.3 免疫指标

2.3.1 LZM 活性 随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼肝脏 LZM 活性逐渐降低(图 6)。1、0.5、0.25、0.125 次/d 组肝脏 LZM 活性分别为 18.94、17.49、17.17、15.68 U/mg,较 2 次/d 组分别下降 7.66%、

9.35%、17.23%、28.48%；其中,2次/d组与0.125次/d组存在显著性差异($P < 0.05$),其他各组之间无显著差异($P > 0.05$)。

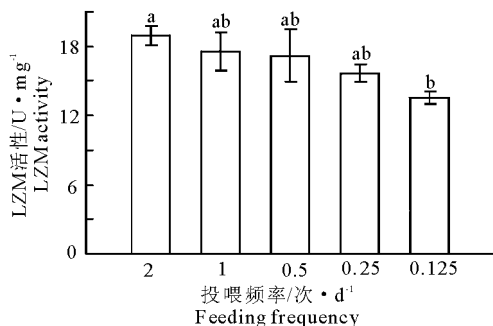


图6 投喂频率对史氏鲟幼鱼 LZM 活性的影响
Fig.6 Effect of feeding frequency on LZM activity of juvenile *A. schrenckii*

2.3.2 IgM 含量 史氏鲟幼鱼肝脏 IgM 含量变化见图 7。随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼肝脏 IgM 含量呈先升高、后降低的趋势;其中,0.25 次/d 组肝脏 IgM 含量最大,为 35.67 $\mu\text{g}/\text{mg}$,分别是 2、1、0.25、0.125 次/d 组的 1.32、1.16、1.10、1.30 倍,且 0.25 次/d 组与 2 次/d 和 0.125 次/d 组存在显著性差异($P < 0.05$),其他各组之间差异不显著($P > 0.05$)。

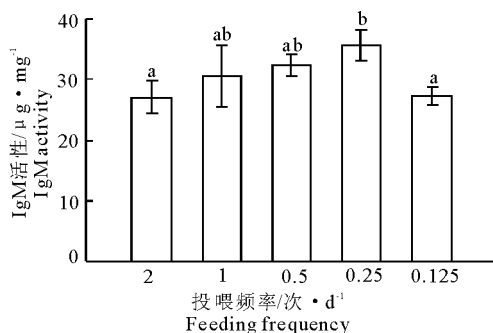


图7 投喂频率对史氏鲟幼鱼肝脏 IgM 含量的影响
Fig.7 Effect of feeding frequency on IgM content of juvenile *A. schrenckii*

3 讨论

3.1 投喂频率对史氏鲟幼鱼生长性能的影响

投喂频率是鱼类养殖管理的主要环节之一,也是影响其摄食和生长的重要因素。研究表明,投喂频率的升高会显著增加鱼类的生长速度,而投喂频率达到一定值时,其对鱼类生长性能的影响将不再显著。王伟等(2018)研究表明,花鲈的投喂频率由1次/2d提高到2次/d时,鱼体的增重率和特定生长率显著升高,但由2次/d增至4次/d后,其增重率和特定生长率无显著性变化;金鲳(*Trachinotus*

ovatus)、许氏平鲈(*Sebastes schlegeli*)和瓦氏黄颡鱼(*Pelteoba grus vachelli*)也得出类似结果(覃志彪等,2011;冒树泉等,2015;Wu et al,2015);但也有研究表明,随着投喂频率的增加,鱼的生长速度、增重率等生长指标会持续增大,如尼罗系吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)幼鱼、波斯鲟(*Acipenser persicus*)和杂交鲟等(孙晓锋等,2011;Zolfaghari et al,2011;Luo et al,2015),其原因可能与实验设计有关,即实验所设计投喂频率的最大值并未达到实际适宜投喂频率的最大值。

本研究中,随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼的增重率、特定生长率、肝体比和脏体比均显著下降($P < 0.05$),其主要原因是由于投喂频率下降,导致史氏鲟的摄食间隔增大,鱼体会将摄食获得及自身储存的能量用于维持基础生命代谢活动上,从而导致鱼体生长速度下降(于赫男等,2010)。史氏鲟幼鱼的增重率、特定生长率、肝体比和脏体比等指标与投喂频率呈正相关关系,从生长性能角度看,史氏鲟幼鱼的最低投喂频率不应低于0.125次/d,最大适宜投喂频率应该大于2次/d。Luo等(2015)在研究2、4、6次/d投喂频率对杂交鲟生长性能影响时也得出类似结论,即杂交鲟的特定生长率与投喂频率呈线性关系,其最佳投喂频率不是6次/d,而可能是8次/d或10次/d。

本实验条件下,各投喂频率组史氏鲟幼鱼的存活率均为100%,说明投喂频率对其存活不存在显著影响;另外,投喂频率对史氏鲟幼鱼肥满度的影响也不具有统计学意义,这与以往对非洲鲶(*Clarias gariepinus*)、鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)的研究结论相同(Marimuthu et al,2011;仇登高等,2018)。

3.2 投喂频率对史氏鲟幼鱼抗氧化指标的影响

投喂频率过低会对鱼类造成一定程度的饥饿胁迫,导致鱼体产生大量氧自由基(ROS),从而对重要的组织器官造成损伤。抗氧化酶系统可以催化清除生物体内过多的ROS,是生物体内抗氧化防御体系的重要组成部分,而超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)则是抗氧化防御体系中非常重要的功能酶(乔秋实等,2011);二者相互关联,可联合清除活性氧自由基,其活性下降标志着机体清除活性氧自由基的能力下降(洪美玲等,2007)。本研究表明,各投喂频率组史氏鲟幼鱼的肝脏SOD活性变化差异不显著($P > 0.05$),不具有统计学意义,这与仇登高等(2018)的研究结果相同;而随着投喂频率

的降低,史氏鲟幼鱼肝脏 CAT 活性呈先升高、后降低的趋势,0.5、0.25 次/d 组肝脏 CAT 活性显著高于 0.125 次/d 组 ($P < 0.05$),其他各组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。这表明当投喂频率降至 0.5 次/d 及以下时,已对史氏鲟幼鱼造成了短期饥饿胁迫,鱼体提高 CAT 活性应对胁迫反应,这是短期饥饿胁迫对鱼体抗氧化酶活性产生了诱导效应,是鱼体克服不良环境的一种适应性改变(于赫男等,2010);而当投喂频率降至 0.125 次/d 时,CAT 活性显著下降,这主要是由于短期饥饿胁迫对鱼体的抗氧化酶活性造成了抑制效应,反映了鱼体对环境压力十分敏感并可能已受到氧化损伤。

总抗氧化能力的大小是衡量机体抗氧化系统功能的综合性指标,可以反映机体抗氧化防御系统应对外来胁迫的能力,与鱼体的健康程度密切相关(张春玲等,2004)。本研究中,随着投喂频率的下降,史氏鲟幼鱼肝脏 T-AOC 活性显著降低,2 次/d 组 T-AOC 活性显著高于 0.5、0.25、0.125 次/d 组,这也表明了当投喂频率为 0.5 次/d 及以下时,史氏鲟幼鱼应对外来胁迫的能力在减弱,鱼体健康受到了一定程度的威胁;而窦艳君等(2016)研究认为,1、2、3 次/d 的投喂频率对点带石斑鱼 (*Epinephelus malabaricus*) 的 T-AOC 活性无显著性影响,与本研究的结果不同;其原因可能是由于投喂设计频次及实验鱼种不同所致。

谷胱甘肽(GSH)是一种低分子活性氧自由基清除剂(罗祖娟,2013),也是清除 ROS 非常重要的非酶抗氧化物质(王娜等,2012);而丙二醛是 ROS 与脂质发生过氧化反应的产物,可以反映细胞受活性氧自由基攻击的程度,从而间接反映机体抗氧化能力的强弱及组织细胞受损伤的严重程度(罗祖娟,2013;谢明媚等,2015)。随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼肝脏 GSH 含量先升高、后降低,0.5、0.25、0.125 次/d 组显著低于 1 次/d 组 ($P < 0.05$);而肝脏 MDA 含量呈逐渐增加趋势,0.5、0.25、0.125 次/d 组显著高于 1、2 次/d 组 ($P < 0.05$)。这再次验证了当投喂频率降至 0.5 次/d 及以下时,史氏鲟幼鱼体内的 GSH 开始急剧消耗,ROS 与组织细胞发生大量脂质过氧化反应而导致细胞受到氧化损伤,醛酮类物质在体内大量积累。

3.3 投喂频率对史氏鲟幼鱼免疫指标的影响

溶菌酶(LZM)和免疫球蛋白 M(IgM)是鱼体非常重要的免疫因子,前者可以破坏革兰氏阳性菌细胞壁中的肽聚糖,从而瓦解细菌细胞(Fevolden

& Roed,1993);后者具有强大的抗感染作用。Li 等(2014)研究发现,投喂频率的下降,显著降低了团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)的溶菌酶活性,导致其机体免疫力下降,增加鱼体对嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)的易感性,这与本研究的结果基本一致。本研究中,随着投喂频率的降低,史氏鲟幼鱼肝脏 LZM 活性呈逐渐降低的趋势,0.125 次/组显著低于 2 次/d 组,而肝脏 IgM 含量呈先升高、后降低的趋势,0.125 次/d 组显著低于 0.25 次/d 组。这表明投喂频率降低了史氏鲟幼鱼肝脏 LZM 活性及 IgM 的合成,对鱼体免疫功能产生了显著的抑制作用,降低了鱼体的免疫力,其原因可能是鱼类受环境胁迫作用时,大量免疫抑制因子会在外围淋巴组织中产生,并逐渐被释放到血液中,从而影响巨噬细胞和淋巴细胞的含量及活性,进而抑制了免疫应答(Mock & Peters,1990)。

4 结论

(1)投喂频率对史氏鲟幼鱼的生长、抗氧化及免疫指标有显著影响。随着投喂频率的降低,其增重率、特定生长率、肝体比和脏体比显著降低,肝脏 SOD、T-AOC、LZM 活性逐渐降低,GSH、IgM 含量及 CAT 活性先升高后降低,MDA 含量逐渐增加。

(2)当投喂频率低至 0.5 次/d 时,史氏鲟幼鱼肝脏细胞已发生氧化损伤。建议史氏鲟幼鱼的最低投喂频率为 1 次/d。

参考文献

- 窦艳君,邢克智,王庆奎,等,2016. 投喂频率对点带石斑鱼生长和血浆抗氧化指标的影响[J]. 渔业现代化,43(2): 1-6.
- 杜海明,刘文奎,张磊,等,2007. 投喂频率对鳃幼鱼摄食及生长的影响[J]. 淡水渔业,37(6): 15-18.
- 洪美玲,陈立侨,顾顺樟,等,2007. 不同温度胁迫方式对中华绒螯蟹免疫化学指标的影响[J]. 应用与环境生物学报,13(6): 818-822.
- 刘淑兰,孙国祥,李杰,等,2019. 投喂频率对大西洋鲑生长和生理指标的影响[J]. 水产科学,38(3): 341-346.
- 罗祖娟,2013. 高温胁迫对吉富罗非鱼影响的研究[D]. 南宁:广西大学.
- 冒树泉,邹明好,王春生,等,2014. 许氏平鲉幼鱼适宜投喂频率的研究[J]. 动物营养学报,26(8): 2379-2385.
- 仇登高,郑乐云,黄种持,等,2018. 投喂频率对流水养殖鞍带石斑鱼生长、摄食及免疫酶活力的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),40(7): 51-57.
- 乔秋实,徐维娜,朱浩,等,2011. 饥饿再投喂对团头鲂生长、

- 体组成及肠道消化酶的影响[J]. 淡水渔业, 41(2): 63 - 68.
- 石小涛, 2006. 史氏鲟在拥挤胁迫中的应激反应[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 孙存军, 2011. 饵料类型和投喂频率对鳃幼鱼摄食、生长、肌肉成分和消化酶活力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 孙大江, 曲秋芝, 马国军, 等, 2000. 史氏鲟人工繁殖及养殖技术[M]. 北京: 海洋出版社: 4 - 12.
- 孙晓锋, 冯健, 陈江虹, 等, 2011. 饱食投喂频率对尼罗系吉富罗非鱼幼鱼胃排空、生长性能和体组成的影响[J]. 水产学报, 35(11): 1677 - 1683.
- 覃志彪, 赵海祥, 赵华林, 等, 2011. 投喂频率对瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 幼鱼胃排空、生长效益及体组成影响[J]. 海洋与湖沼, 42(4): 506 - 511.
- 王娜, 邵晨, 颜志刚, 等, 2012. 低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力[J]. 生态学报, 32(11): 3538 - 3545.
- 王伟, 张凯强, 温海深, 等, 2018. 投喂频率对花鲈幼鱼胃排空、生长性能和体组分的影响[J]. 中国海洋大学学报, 48(6): 55 - 62.
- 谢明媚, 彭士明, 张晨捷, 等, 2015. 急性温度胁迫对银鲳幼鱼抗氧化和免疫指标的影响[J]. 海洋渔业, 37(6): 541 - 548.
- 于赫男, 林小涛, 许忠能, 等, 2010. 投喂频次对凡纳滨对虾行为及免疫功能的影响[J]. 生态科学, 29(1): 63 - 69.
- 张春玲, 胡俊峰, 王丕文, 等, 2004. 苯并(a)芘对鲫鱼肝脏总抗氧化能力的影响[J]. 环境与健康杂志, 21(5): 324 - 326.
- 朱晓芳, 曹潇, 巩建华, 等, 2017. 投喂频率对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长及系统水质指标的影响[J]. 海洋科学, 41(8): 32 - 39.
- Aderolu A Z, Seriki B M, Apatira A L, et al, 2010. Effects of feeding frequency on growth, feed efficiency and economic viability of rearing African catfish (*Clarias gariepinus*, Burchell 1822) fingerlings and juveniles[J]. African Journal of Food Science, 4(5): 286 - 290.
- Fevolden S E, Roed K H, 1993. Cortisol and immune characteristics in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) selected for high or low tolerance to stress[J]. Journal of Fish Biology, 43(5): 919 - 930.
- Guroy D, Deveciler E, Kutguroy B, et al, 2006. Influence of feeding frequency on feed intake, growth performance and nutrient utilization in European sea Bass (*Dicentrarchus labrax*) fed pelleted or extruded diets[J]. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences, 30(1): 171 - 177.
- Lee S, Hwan G U, Cho S H, 2000. Effects of feeding frequency and dietary moisture content on growth, body composition and gastric evacuation of juvenile Korean rockfish (*Sebastes schlegeli*) [J]. Aquaculture, 187(3): 399 - 409.
- Li X F, Tian H Y, Zhang D D, et al, 2014. Feeding frequency affects stress, innate immunity and disease resistance of juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala* [J]. Fish Shellfish Immun, 38(1): 80 - 87.
- Luo L, Li T L, Xing W, et al, 2015. Effects of feeding rates and feeding frequency on the growth performances of juvenile hybrid sturgeon, *Acipenser schrenckii* Brandt ♀ × *A. baeri* Brandt ♂ [J]. Aquaculture, 448: 229 - 233.
- Marimuthu K, Cheen A C, Muralikrishnan S, et al, 2011. Effects of different feeding frequency on the growth and survival of African catfish (*Clarias gariepinus*) fingerlings[J]. Advances in Environmental Biology, 4(2): 187 - 193.
- Mock A, Peters G, 1990. Lysozyme activity in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), stressed by handling, transport and water pollution[J]. Journal of Fish Biology, 37(6): 873 - 885.
- Sweka J A, Cox M K, Hartman K J, 2004. Gastric evacuation rates of brook trout [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 133(1): 204 - 210.
- Wang N, Hayward R S, Noltie T B, 1998. Effects of feeding frequency on food consumption, growth, size variation, and feeding pattern of age-0 hybrid sunfish [J]. Aquaculture, 165(3/4): 261 - 267.
- Wang Y, Kong L Y, Li K, et al, 2007. Effects of feeding frequency and ratio level on growth, feed utilization and nitrogen waste output of cuneate drum (*Nibea miichthioides*) reared in net pens [J]. Aquaculture, 271(1/4): 350 - 356.
- Wu Y, Han H, Qin J, et al, 2015. Effect of feeding frequency on growth, feed utilization, body composition and waste output of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) reared in net pens [J]. Aquaculture Research, 46(6): 1436 - 1443.
- Xie F, Ai Q H, Mai K S, et al, 2011. The optimal feeding frequency of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*, Richardson) larvae [J]. Aquaculture, 311(1/4): 162 - 167.
- Zolfaghari M, Imanpour M R, Najafi E, 2011. Effect of photoperiod and feeding frequency on growth and feed utilization of fingerlings Persian sturgeon (*Acipenser persicus*) [J]. Aquaculture Research, 42: 1594 - 1599.

Effects of Feeding Frequency on Growth, Antioxidant Capacity and Immune Response of Juvenile *Acipenser schrenckii*

GUAN Min, ZHANG De-zhi, ZHANG Hou-ben

(Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Conservation of Fishes, Institute of Chinese Sturgeon, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, P.R.China)

Abstract: *Acipenser schrenckii* (Amur sturgeon) is the primary species of sturgeon cultured in China and it has high nutritional and economic value. Improper feeding can result in deteriorating aquaculture water quality, so feeding frequency is critical for healthy culturing of *A. schrenckii*. In this study, we studied the effects of feeding frequency on the growth, antioxidant capacity and immune indices of juvenile *A. schrenckii*, aiming to find out the optimal feeding frequency and provide theoretical guidance for the intensive healthy culture of *A. schrenckii*. Five feeding frequencies (2, 1, 0.5, 0.25 and 0.125 times/d) were set for the 56-day experiment and 300 7-month-old *A. schrenckii* juveniles were selected for testing (60 fish/treatment), with an average body weight of (377.40 ± 13.59) g and average body length of (34.15 ± 1.63) cm. During the experiment, water temperature, DO, pH, ammonia nitrogen and nitrite in the aquaculture water were sustained, respectively, at $17.2 - 19.5^\circ\text{C}$, $6.0 - 7.0$ mg/L, $7.2 - 7.6$, <0.1 mg/L and <0.05 mg/L. At the end of the experiment, 15 individuals were sampled from each treatment. Indicators of growth, antioxidant capacity and immune responses were measured and each was significantly affected by feeding frequency. As feeding frequency decreased, the weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR), hepatosomatic index (HSI) and viserosomatic index (VSI) of juvenile *A. schrenckii* significantly decreased ($P < 0.05$), but survival rate (SR) and condition factor (CF) did not change significantly ($P > 0.05$). In terms of the antioxidant capacity, the activities of T-AOC and SOD in the liver gradually decreased with decreased feeding frequency. The T-AOC activity in the 2 times/d feeding group was significantly different from that in the 0.5, 0.25 and 0.125 times/d groups ($P < 0.05$), but the difference in SOD activity was not significant ($P > 0.05$). The CAT activity and GSH content in liver initially increased and then decreased with decreased feeding frequency. The CAT activity in the 0.5, 0.25 times/d groups were significantly higher than in the 0.125 times/d group ($P < 0.05$), and the GSH content in the 1 time/d group was significantly higher than in the 0.5, 0.25 and 0.125 times/d groups ($P < 0.05$). The MDA content in liver increased gradually with decreased feeding frequency and the MDA content in the 0.5, 0.25 and 0.125 times/d groups were significantly higher than that in the 2 and 1 times/d group ($P < 0.05$). For the immune indices, the LZM activity in the liver gradually decreased with decreased feeding frequency and the difference between the 2 times/d group and the 0.125 times/d group was significant ($P < 0.05$), while the liver IgM content initially increased and then decreased, and the 0.25 times/d group was significantly higher than the 2 and 0.125 times/d groups ($P < 0.05$). Based on our results, the optimal feeding frequency of juvenile *A. schrenckii* is 1 time/d, which avoids oxidative damage caused by lower feeding frequencies and water quality deterioration caused by higher feeding frequencies.

Key words: *Acipenser schrenckii*; feeding frequency; growth; antioxidant capacity; immune response