

养殖密度对中华鲟行为、免疫力和养殖环境水质的影响

张晓雁^{1,2,3,5}, 李罗新⁴, 危起伟^{1,3,4*}, 张先锋^{1,3*},
沈 丽⁴, 张艳珍⁵, 杨道明⁵, 栾 钢⁵, 刘健伟⁶

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院水生生物多样性与保护重点实验室, 湖北 武汉 430072; 4. 农业部淡水生物多样性保护与利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北 荆州 434000; 5. 北京海洋馆, 北京 100081; 6. 中国水产科学研究院, 北京 100141)

摘 要: 以北京海洋馆驯养的野生和子一代中华鲟为对象, 研究了养殖密度对中华鲟行为、免疫力和养殖环境水质的影响。结果表明: 在养殖密度分别为 2.7、2.4、2.0 kg/m³ 的循环水环境中, 中华鲟的泳层分布改变, 体型小的中华鲟变化最大。3 种密度环境对中华鲟食欲未有明显影响, 对野生中华鲟和 F1-1998 的泳速和呼吸频率也未有明显影响。2.7 kg/m³ 的密度下, F1-1998 的超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活力、超氧化物歧化酶/丙二醛值下降, 而丙二醛水平上升。在养殖密度为 2.7 和 2.4 kg/m³ 的水环境时, 水体悬浮总细菌数量持续大于 8 000 cfu/100 mL, 年龄大的中华鲟, 包括野生中华鲟和 F1-1998 中华鲟细菌感染。同期对水质监测结果表明, 氨/铵、亚硝酸盐和浊度稳定, 硝酸盐、磷酸盐和总细菌随养殖密度下降而降低, 溶解氧、酸碱度上升, 各密度组间存在显著性差异 ($p < 0.05$), 硝酸盐、磷酸盐、总细菌与养殖密度存在着显著的正相关。实验表明, 使用循环水养殖中华鲟, 环境负荷对水体微生物和养殖鱼免疫力的影响是极为显著的。推荐最佳养殖密度为 2.0 kg/m³。

关键词: 中华鲟; 养殖密度; 循环水; 水质; 人工饲养; 行为; 免疫力

中图分类号: Q178.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2011)11-1348-07

高养殖密度可以高效利用水资源, 提高养殖效益。但是高密度养殖容易导致系统负载率增高, 系统不能及时清除代谢物, 造成水质下降^[1]。高养殖密度导致饲养个体间食物和空间竞争, 作为一种慢性环境胁迫因子, 也可导致鱼类行为和免疫力等发生改变^[2~4]。高密度养殖引起的鱼类应激通过下丘脑-垂体-肾间组织轴, 交感神经-嗜铬组织轴, 使得鱼生理改变, 对应激产生生理变化^[5~6], 增大鱼类疾病发生的可能性。低 pH 值可使草鱼的呼吸生理功能受到干扰, 氧代谢紊乱, 使肝脏的抗氧化力下降^[7~8]; 高氨氮使鲤鱼等鱼类鳃变性和肝细胞破坏^[9]; 高亚硝酸盐也可成为影响鱼生长的胁迫因子^[10]; 鱼的消化酶活力也直接受到生态因子的影响, 进而影响鱼的健康和生长^[11]。中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 是我国的一级保护动物, 近年来资源量持续衰退^[12], 已经被列为 IUCN 的极危物种, 对其进行人工圈养是实施保护和人工增殖研究的有效措施之一^[13]。研究循环水养殖中华鲟, 以及养殖密度对水质和养殖鱼免疫力及行为的关系, 对规范中华鲟的养殖技术具有指导意义。2008 年 12 月~2009 年 8 月, 作者在北京海洋馆就养殖密度对水质和中华鲟行为及免疫力的影响进行了实验。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

实验鱼是在 2005~2008 年, 先后从长江水产研究所中华鲟实验基地迁至北京海洋馆淡水饲养, 共

收稿日期: 2011-03-07; 修回日期: 2011-03-31

基金项目: 中国水产科学研究院研究型业务专项 (2011C002); 农业公益性行业科研专项淡水水生生物资源增殖放流及生态修复技术研究 (200903048); 三峡工程环境保护补偿经费生态建设类 (施工区外) 三峡工程珍稀鱼类增殖放流项目 (2005-2009)

作者简介: 张晓雁 (1973~), 女, 山东省栖霞人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事鱼类生理生态学和水族馆科学与技术方向的研究。

E-mail: zn7@sina.com

* 通讯作者 E-mail: weiqw@yfi.ac.cn; zhangx@ihb.ac.cn

68 尾,包括 6 尾野生中华鲟和 3 个年龄组若干子一代养殖中华鲟。其中野生中华鲟为人工产后亲鱼,在北京海洋馆达到康复(简称为 W-N),子一代中华鲟为 1998、2001、2005 年人工繁殖个体(编号为 F1-1998, F1-2001, F1-2005),实验初始体重分别为 $227 \pm 39.7 \text{ kg}$ ($n=6$), $54.3 \pm 7.4 \text{ kg}$ ($n=7$), $36.1 \pm 10.6 \text{ kg}$ ($n=18$), $24.7 \pm 4.7 \text{ kg}$ ($n=37$)。

1.2 养殖设施和日常管理

饲养池为长方形水泥池,规格为 29.0 m(长)×11.0 m(宽)×4.4 m(高),观察窗为 20.0 m(长)×3.0 m(高),总水量达 1 200 m³。饲养池循环率为 50 min/次,可以对水温及其他水质指标进行实时人工监控和调节。照明恒定为 8:30~18:30。试验温度控制在 $22.3 \pm 0.4^\circ\text{C}$ 。

每周定期吸出池底污物,冲洗砂滤罐。

饲料主要以鲜饲料和人工合成饲料为主,每周喂 5 次,每次投饵率为(体重比):W-N(0.8%), F1-1998(1.3%), F1-2001(3%)和 F1-2005(3%)。W-N 和 F1-1998 采用潜水员水下喂食鲜饲料, F1-2001 和 F1-2005 采用撒食鲜饲料和人工合成饲料。

1.3 试验设计

试验共 3 个密度组,分别为 2.7、2.4 和 2.0 kg/m³,也即分别为 3 300、2 900 和 2 400 kg 养殖总重量,通过移出子一代个体以调节养殖密度,养殖数量分别为 68、46、25 尾。每个密度组连续养殖 3 个月。

1.4 水质参数

实验期间对水体溶解氧(DO)、酸碱度(pH)每日测定 1 次,对氨/铵(NH₃/NH₄⁺)、亚硝酸盐(NO₂⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)、磷酸盐(PO₄³⁻)、浊度、总细菌 6 个指标每周检测 2~3 次以上。

pH 值采用 HANNA 便携 pH 计(复合 pH 电极,带自动温度补偿 ATC,产自意大利)测量;DO 采用 HACH 溶氧仪,渗透膜法测量;NH₃/NH₄⁺、NO₂⁻、NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 含量采用 HACH 分光光度计测量,检测值低于 0.01 mg/L 时,以 0.01 记录。总细菌数量采用 HACH 试剂,Millipore 膜过滤法检测。

1.5 行为与生理观察

观察项目包括:泳层(下层:距池底 0~1.5 m;中层:距池底 1.5~3.0 m;上层:距池底 3.0~4.4 m),平衡性,摄食主动性,泳速,呼吸频率等。前三项每天定时观察 3 次,每次观察 40 min。后两项采用随机采样,分别随机选取 4 尾健康的 W-N 和 F1-1998 观察。固定每日监测发病鱼的呼吸频率,并增

加 B 超(SonositeMacromaxx)检查消化道和腹腔项目。对病亡鱼类进行病理组织取样,病理组织标本经常规石蜡包埋切片法光镜观察。

在实验末期测定血浆超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)活性、丙二醛(MDA)含量。测定方法:尾静脉采血后用肝素钠抗凝,3 000 r/min 离心 20 min 后取上清,-4℃ 保存备用。SOD 含量检测用黄嘌呤氧化酶法,MDA 含量测定用硫代巴比妥酸法,GSH-PX 含量测定采用比色测定法。试剂盒由南京建成生物工程研究所提供。

1.6 数据统计与参数计算

数据通过统计软件 SPSS13.0 进行分析处理。结果为平均值±标准差。水质数据,鱼的泳速和呼吸频率利用方差分析(one-way ANOVA)分别检验各实验组的差异显著性,利用 S-N-K 法进行多重比较。使用 Pearson Correlations 分析养殖密度和水质数据的相关性。不同组的血清抗氧化酶活力利用 Independent Two-Sample T Test 检验显著性差异。

2 结果

2.1 游泳行为

实验表明,随养殖密度下降,不同体型的中华鲟泳层分布会发生变化(表 1)。高密度时,体型较大的中华鲟,包括 W-N 和 F1-1998,主要分布在鱼池上层,体型较小的中华鲟,包括 F1-2001 和 F1-2005,分布在鱼池下层。低密度时,除体型最大的 W-N 在上层活动居多外,其余体型的中华鲟在各水层活动。高密度环境时下层鱼的碰撞频率明显高于低密度时的频率。

表 1 不同密度组中华鲟的泳层分化

Tab. 1 Swimming-level Distribution at Different Densities

项目	养殖密度(kg/m ³)		
	2.7	2.4	2.0
W-N	上层	上层	上层,偶尔下层
F1-1998	上层,中层	上层,中层	中层,下层,上层
F1-2001	下层	下层	中层,下层,上层
F1-2005	下层	中层,下层	中层,下层,偶尔上层

各实验组,健康的中华鲟均积极主动摄食,游泳无统一的方向,平衡性较好;泳速和呼吸基本稳定,各组间无显著性差异($p>0.05$)。在同一组内,W-N 的泳速低于 F1-1998,而呼吸频率反而较快(表 2)。

表 2 各密度组中 W-N 和 F1-1998 的泳速和呼吸频率
Tab. 2 Swimming Velocity and Respiratory Frequency
of the Wild($n=4$) and the F1-1998 Sturgeon($n=4$)
at Different Densities

养殖密度 (kg/m^3)	W-N($n=4$)		F1-1998($n=4$)	
	泳速 (s/全长*)	呼吸频率 (次/min)	泳速 (s/全长*)	呼吸频率 (次/min)
2.7	6.25 ± 1.31	23 ± 7	4.18 ± 0.85	20 ± 8
2.4	6.93 ± 1.25	22 ± 7	4.60 ± 1.40	18 ± 7
2.0	6.98 ± 2.25	25 ± 5	4.24 ± 1.24	20 ± 5

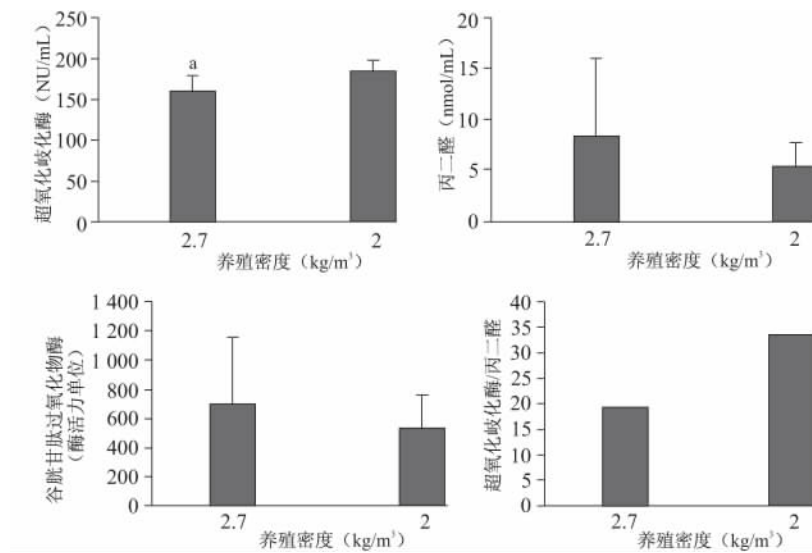
* 全长为鱼全长

2.2 生理指标

在 2.7 和 2.0 kg/m^3 实验组, F1-1998 的 SOD、GSH-PX 和 MDA 检测结果显示(图 1), 在 2.0 kg/m^3 养殖密度下 SOD 活性显著升高, 两组间呈现显著性差异($p < 0.05$), MDA 水平和 GSH-PX 活性下降, 两组间无显著性差异($p > 0.05$), SOD/MDA 值显著上升, 增幅近 1 倍。

2.3 病亡鱼的行为学异常及组织学与微生物诊断

在养殖末期, 高、中密度组中, 有 5 尾中华鲟相继发病, 发病鱼的异常行为和检查结果如表 3。



注: $n=6$, a 表示在 5% 水平上的显著差异

图 1 不同实验组 F1-1998 的抗氧化指标(SOD, MDA, GSH-PX, SOD/MDA)比较

Fig. 1 SOD, MDA, GSH-PX, SOD/MDA in Serum of F1-1998 at Different Densities

表 3 各实验组发病鱼的异常行为和检查结果

Tab. 3 Information of Diseased Fish at
Different Stocking Densities

养殖密度 (kg/m^3)	发病鱼	发病鱼的异常行为和检查结果
2.7	1 尾 W-N	拒食, 嘴红肿, 明显外突
2.4	2 尾 W-N	第一尾: 右侧鳃盖张开 6 cm, 不能随呼吸而闭合 第二尾: 突然拒食, 次日腹部肿胀, 泄殖孔不能完全闭合, B 超检查, 腹腔积液, 深度达 3 cm
2.4	2 尾 F1-1998	第一尾: 突然拒食, 正常游泳时呼吸频率加快, 于正常 2 倍, 体表粘液分泌增多。(最终死亡) 第二尾: 呼吸急促, 游动时头向上呈 45 度, 泄殖孔微红

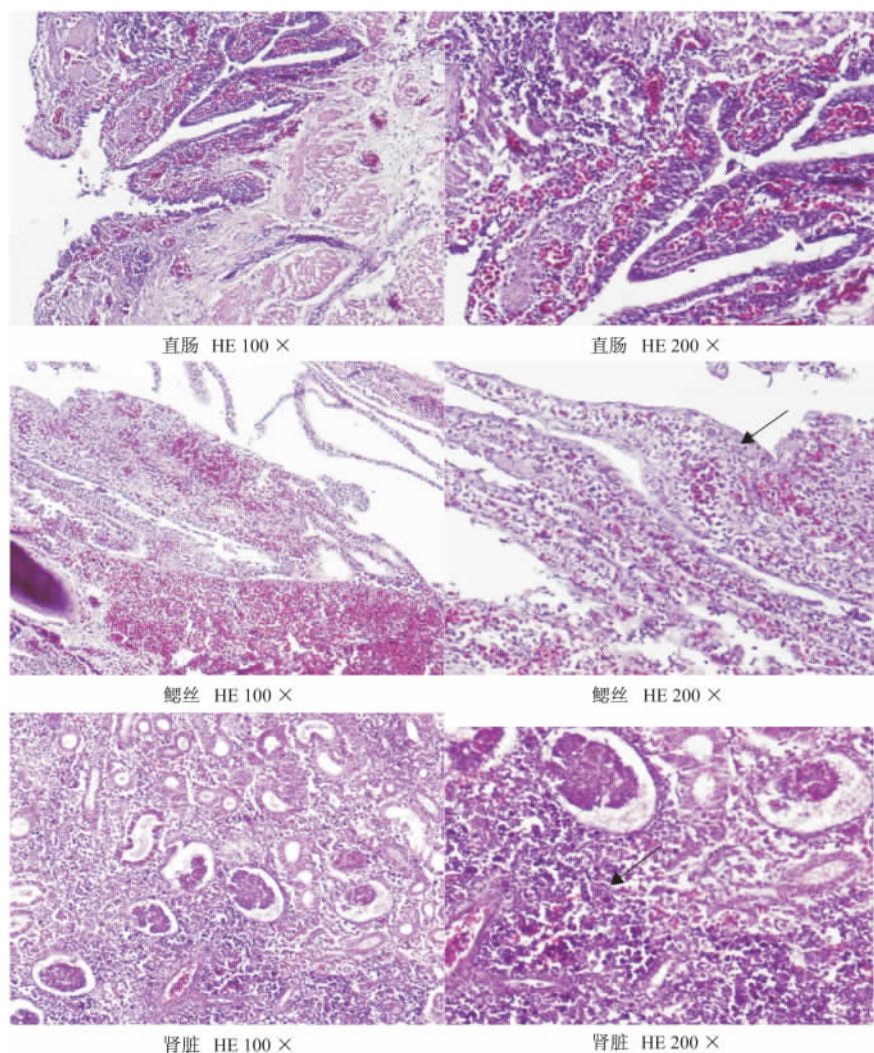
经使用抗生素对疾病中华鲟医疗, 4 尾痊愈, 1 尾 F1-1998 死亡。死亡鱼病理诊断结果显示, 多处组织器官出现炎症病变, 肠道和鳃炎症严重, 咽、食道和胃炎较轻, 肝脏局灶性肝炎, 冠状室、性腺和

脾脏炎, 肾小球肾炎, 肾管型(图 2)。对死亡鱼的组织和血液微生物培养的结果为, 鳃受多种菌感染, 一种为优势菌, 肝脏一种菌; 肾脏两种菌, 第一种菌多于第二种菌, 血培养结果为嗜水气单胞菌。对疾病和死亡鱼的诊断结论为细菌性感染。

2.4 水质指标

在监测的 8 项水指标中(表 4), $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 、 NO_2^- 和浊度值基本保持平稳, 各实验组间无显著性差异。 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、总细菌值随着密度的降低显著下降($p < 0.05$), 低密度组的 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 值比中、高密度组降幅分别达 50% 和 40% 左右, 低、中、高密度组总细菌值依次下降近 30% 和 50%。DO 随密度降低而升高($p < 0.05$), 各实验组依次增高不足 3%。

对以上检测的各项水指标结果使用线性相关分析显示(表 5), NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、pH 和总细菌与养殖密



注:箭头所指为炎性细胞

图 2 直肠、鳃和肾脏的病理组织切片图

Fig. 2 Histology of the Rectum, the Gill Lamellae and the Kidney

表 4 水质指标的变化

Tab. 4 Physiochemical and Microbiological Parameters at Different Stocking Densities

养殖密度 (kg/m ³)	pH	DO (mg/L)	NH ³ /NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	浊度 (NTU)	总细菌 (cfu/100 mL)
2.7	7.87±0.05 ^a	7.56±0.34 ^a	0.01	0.01	54.89±6.18 ^a	4.08±0.57 ^a	0.06±0.010	10 908±6 639 ^a
2.4	7.85±0.02 ^b	7.72±0.33 ^b	0.01	0.01	50.40±10.10 ^a	3.89±0.70 ^a	0.057±0.005	7 672±5 208 ^b
2.0	7.80±0.06 ^c	7.80±0.45 ^c	0.01	0.01	26.44±7.50 ^b	2.40±0.45 ^b	0.058±0.005	3 732±2 447 ^c

注:同一列不同字母表示在 5%水平上的显著差异

表 5 养殖密度和水质指标的相关性(以 r 值表示)

Tab. 5 Correlations Between the Physiochemical and Microbiological Parameters and Stocking Density (r value shown)

水质指标	酸碱度 pH	溶解氧 DO	硝酸盐 NO ₃ ⁻	磷酸盐 PO ₄ ³⁻	总细菌 Total bacteria	浊度 NTU
r 值	0.514*	-0.450*	0.810*	0.766*	0.485*	0.092

注: * 表示在 1%水平上的显著差异

度之间显著正相关($p < 0.01$), DO 与养殖密度呈显著负相关($p < 0.01$), 而浊度与养殖密度无显著相关性($p > 0.01$)。

3 讨论

3.1 养殖密度对行为的影响

Papoutsoglou^[4]曾报道海鲈在不同养殖密度下

行为发生变化,认为高养殖密度时摄食集群行为可能明显,而其他学者对史氏鲟稚鱼研究时,并未发现随密度改变出现集群行为^[14]。本实验的各密度环境中,中华鲟没有出现明显的集群行为。然而随养殖密度下降,不同体型的中华鲟泳层发生不同的分化,体型最大的 W-N 泳层变化不大,体型最小的 F1-2005 泳层变化最大,这说明中华鲟对空间竞争优势与其体型成正比。由于密度降低,鱼对生活空间竞争下降,体型小的鱼可以在更大的空间活动。

水体溶解氧、酸碱度影响鱼的呼吸频率^[15],水的流速将干扰鱼的游泳行为^[16]。本文实验期间,养殖水体的溶解氧、酸碱度和水流比较平稳,因而不会影响鱼的呼吸频率和泳速。另外, W-N 和 F1-1998 体型大,具有水域空间竞争优势,在高密度时“情绪”也能保持稳定,因此,游泳行为可能受养殖密度影响不大。

3.2 养殖密度对免疫力的影响

有学者报道, SOD 活性对水生动物的免疫功能有重要作用, MDA 的含量间接反应机体细胞损伤的严重程度^[17,18]。刘松岩^[19]报道,在高密度环境下,中华鲟的 SOD 活性下降, MDA 水平上升。本试验中, SOD 活性和 MDA 含量在高密度环境时的变化趋势与其结果一致,然而 SOD 活性低于其报道的结果,这可能由于实验鱼体型差别大,致使结果存在差异。高密度环境时 SOD/MDA 值显著低于低密度环境,这个结果也提示高密度环境使机体的抗氧化能力下降,脂质过氧化反应增强^[19]。吴长珠等曾报道^[20], GSH-PX 具有抗氧化功能,当受到过氧化损伤时,测定值升高。本文中高密度环境时鱼脂质过氧化增强, MDA 含量上升,使 GSH-PX 值升高,与上述报道一致。

本实验中, W-N 和 F1-1998 发病率高,分别为 50%和 30%左右,而 F1-2001 和 F1-2005 为 0。分析其原因,一方面,馆养 W-N 都在 25 龄左右,趋于高龄^[21],而高龄鱼的生理机能退化,适应能力呈下降趋势,因而其受到环境因子胁迫时更易于被淘汰。另外,野生中华鲟在纯人工环境养殖,其营养和生态条件不同于其天然生境,可能对人工环境的敏感度较高,如果环境条件不适宜,发病率将会增加。总之,虽然 W-N 体型大,具有水域空间竞争优势,然而高密度环境的制约仍然可能导致其抗病力下降,易感性增强。

子一代中华鲟长期生活在人工环境中,对空间的占有率明显低于自然生境,更容易适应高密度环

境,适应力高于野生鱼,发病率相对较低。然而,由于人工投喂的饵料较单一,提供的营养不能完全满足其生长发育变化的需求,就表现为养殖时间长的大龄子一代中华鲟对不适环境表现得更敏感。因此可知,养殖大龄的野生和子一代中华鲟,通过改良水质条件,也许能减少营养单一对其长期养殖的不利影响,使其保持健康生长。

3.3 养殖密度对水质的影响

已有的资料表明,封闭循环水养殖水处理系统对各种物质的处理效率不同^[1,22]。本实验中,在不同养殖密度下,对鱼有毒性的 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 一直保持在 0.012 5 mg/L 的养殖安全水平^[23]以下, NO_2^- 也保持 0.01 mg/L,其余 6 个水指标随着养殖密度下降分别不同程度降低或者升高,这说明循环水养殖环境中,系统处理各指标的效率存在差别,因此,这些波动的水指标及波动程度也是控制环境负荷的关键指示指标。

本文结果显示, NO_3^- 和 PO_4^{3-} 与养殖密度的相关性极高。Thomas 等^[24]对高首鲟排泄氮的研究表明,全封闭水环境中硝酸盐的累积主要受到鱼摄食蛋白质总量的影响。本实验中,随着养殖密度下降,日投饵总量减少,硝酸盐累积量随着下降。鱼主要从食物中摄取磷,经代谢后将磷主要以磷酸盐形式排出体外^[24]。当养殖密度降低时,总排泄物减少,水中磷酸盐的累积量也相应减少。

对水中总细菌检测表明,其密度随着养殖密度的降低而显著下降($p < 0.05$)。这主要因为高养殖密度和投饵率使水体和底质的有机物含量升高,细菌大量繁殖。这种情况将导致水体中原有正常菌群失衡,条件致病菌快速增殖^[25]。本文中,高、中、低密度组的水细菌数依次降低 30%和 50%,并且在密度从 2.4 kg/m³ 降至 2.0 kg/m³ 时,优势菌从淡水鱼致病力较强的嗜水气单胞菌和维罗纳气单胞菌温和生物变种,转变为致病力较弱的鲁氏不动杆菌和鲍曼不动杆菌等^[25~27]。这显然说明,水中优势菌的种类与水体细菌总数相关联。另外,在密度 2.7 和 2.4 kg/m³ 时,水细菌总数基本大于 8 000 cfu/100 mL,鱼的免疫力下降,鱼陆续出现细菌感染性疾病,而且病亡鱼血液中的感染菌与水体优势菌相同,而密度为 2.0 kg/m³ 时,细菌总数低于 8 000 cfu/100 mL,鱼不发病,这说明水细菌总量和优势菌种类及鱼的免疫力与养殖密度相关联,2.0 kg/m³ 基本是健康养殖的最大养殖密度。

随着养殖密度降低,池水溶解氧上升,理论上

pH 值也应上升,实际却略有下降。由于使用净化工艺处理循环使用的养殖水,pH 的变化除受到生物代谢和有机物分解等影响以外,可能还受到其他处理工艺的影响,这有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SYRESHA V, LIN C K. Effect of stocking density on water quality and production of red tilapia in a recirculated water-system[J]. Aquacultural Engineering, 1992, 11(1): 1~22.
- [2] 王文博, 李爱华. 环境胁迫对鱼类免疫系统影响的研究概况[J]. 水产学报, 2002, 26(4): 368~374.
- [3] 洪磊, 张秀梅. 环境胁迫对鱼类生理机能的影响[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(1): 113~121.
- [4] PAPOUTSOGLOU S E, TZIHA G, VRETTOS X, et al. Effects of stocking density on behavior and growth rate of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles reared in a closed circulated system[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 18(2): 135~144.
- [5] RUANE N M, HUISMAN E A, KOMEN J. Plasma cortisol and metabolite level profiles in two isogenic strains of common carp during confinement[J]. Journal of Fish Biology, 2001, 59(1): 1~12.
- [6] BONGA W. The stress response in fish[J]. Physiological Reviews, 1997, 77(3): 591~625.
- [7] 余日清, 贺锡勤. 低 pH 对草鱼呼吸活动和耗氧代谢的影响[J]. 环境科学学报, 1992, 12(1): 105~111.
- [8] 马广智, 唐玫, 徐军. 低 pH 值对草鱼鳃和肝组织超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响[J]. 中国水产科学, 2001, 8(1): 23~25.
- [9] 徐镜波, 马逊风. 温度、氨对鲢、鳙、草、鲤草的影响[J]. 中国环境科学, 1994, 14(3): 214~219.
- [10] 余瑞兰, 聂湘平, 魏泰莉, 等. 分子氨和亚硝酸盐对鱼类的危害及其对策[J]. 中国水产科学, 1999, 6(3): 73~77.
- [11] 田宏杰, 庄平, 高露姣. 生态因子对鱼类消化酶活力影响的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(2): 158~162.
- [12] 张慧杰, 杨德国, 危起伟, 等. 葛洲坝至古老背江段鱼类的水质调查[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 86~91.
- [13] WEI Q, HE J, YANG D, et al. Status of sturgeon aquaculture and sturgeon trade in China: A review based on two recent nationwide surveys[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2004, 20(5): 321~332.
- [14] 庄平, 李大鹏, 王明学, 等. 养殖密度对史氏鲟稚鱼生长的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 735~738.
- [15] 林浩然. 鱼类生理学[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 2004: 146~148.
- [16] 李大鹏, 庄平, 严安生, 等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 54~61.
- [17] 姚翠鸾, 王维娜, 王安利. 水生动物体内超氧化物歧化酶的研究进展[J]. 海洋科学, 2003, 27(10): 18~21.
- [18] 李东洋, 张天成, 让慰清, 等. 烹调油烟对大鼠肺组织 SOD 和 MDA 及骨髓 MN 变化的研究[J]. 卫生研究, 1998, 27(6): 382~384.
- [19] 刘松岩. 环境胁迫对中华鲟体内自由基水平和抗氧化酶活力的影响[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2006.
- [20] 吴长珠, 刘友尧, 林建华, 等. 骨瘤患者血液 LPO、SOD、GSH-PX 与 GSH 临床价值的初步探讨[J]. 肿瘤防治研究, 1994, 21(1): 38~40.
- [21] 柯副恩. 论中华鲟的保护与开发[J]. 淡水渔业, 1999, 29(9): 4~7.
- [22] 祁真. 对虾生态工程化养殖系统水环境变化及影响因子研究[D]. 浙江: 浙江大学硕士学位论文, 2004.
- [23] MEADE J W. Allowable ammonia for fish culture[J]. Progressive Fish-Culturist, 1985, 47(3): 135~145.
- [24] THOMAS S L, PIEDRAHITA R H. Apparent ammonia-nitrogen production rates of white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) in commercial aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 17(1): 45~55.
- [25] 战文斌. 水产动物病害学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 8~12.
- [26] 黄志坚, 何建国, 翁少萍, 等. 鳊鱼细菌性病原的分离鉴定及致病性初步研究[J]. 微生物学报, 1999, 26(4): 241~246.
- [27] 陆文浩, 陈辉, 邹勇, 等. 银鲫不动杆菌病原菌鉴定及药敏试验[J]. 水产科学, 2010, 29(3): 156~161.

EFFECTS OF CULTURING DENSITY ON BEHAVIOR AND IMMUNITY OF CAPTIVE *ACIPENSER SINENSIS* AND ON THE WATER QUALITY OF THEIR LIVING POOL

ZHANG Xiao-yan^{1,2,3,5}, LI Luo-xin⁴, WEI Qi-wei^{1,3,4}, ZHANG Xian-feng^{1,3}, SHEN Li⁴,
ZHANG Yan-zhen⁵, YANG Dao-ming⁵, LUAN Gang⁵, LIU Jian-wei⁶

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Key Lab of Aquatic Biodiversity and Conservation, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation and Utilization, Ministry of Agriculture; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Jingzhou 434000, China; 5. Beijing Aquarium, Beijing 100081, China; 6. Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Studies on effects of culturing density on behavior and immunity of the Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* and the effects on the water quality of their living pool were reported in this paper. Six wild sturgeons and 62 offsprings were cultured in three different living densities of 2.7, 2.4 and 2.0 kg/m³ respectively in Beijing Aquarium between 2008 and 2009. Behavioral observation showed that the distribution of swimming-level of fish changed at different culturing densities, and the behavior of younger fish changed more frequently. The sturgeon's appetite didn't show much difference in different densities. Swimming speed and respiratory frequency of wild sturgeons and #F1-1998 didn't changed either. On the other hand, SOD, SOD/MDA and GSH-PX of serum of #F1-1998 decreased, while MDA increased at the density of 2.7 kg/m³. The older fish including wild and #F1-1998 were infected by bacteria at the densities of 2.7 and 2.4 kg/m³ when the total bacteria numbers were continuously higher than 8 000 cfu/100 ml. With the decrease of density, NH₃/NH₄⁻, NO₂⁻ and turbidity did not fluctuated significantly, NO₃⁻, PO₄³⁻ and total bacteria number declined, while DO and pH increased, and there were significant differences ($p < 0.01$) among these parameters at the three different densities. NO₃⁻, PO₄³⁻ and total bacteria numbers were positively correlated significantly with the density. These results indicate that the effect of the environmental capacity on the aquatic microbial communities and the fish immunity is significant when the sturgeons are cultured in recirculated water system. An optimal culturing density is drawn at 2.0 kg/m³ from this study.

Key words: *Acipenser sinensis*; stocking density; circular tank; water-quality; behavior; immunity