

养殖密度对循环水系统中大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*)生长的影响*

乔 玮¹ 宋协法¹ 高淳仁² 刘 滨² 雷霖霖² 翟介明³

(1. 中国海洋大学水产学院 青岛 266003; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室
青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;
3. 山东莱州明波水产有限公司 烟台 264000)

摘要 将初始体重为(580.9±44.65) g的大菱鲂成鱼按照低密度 A 组 14.30 kg/m²、中密度 B 组 20.49 kg/m²、高密度 C 组 31.32 kg/m²的标准分为 3 个不同养殖密度组,并放养于循环水养殖系统中 120 d,同时对大菱鲂成活率、体重差异、饵料系数、溶菌酶水平及养殖水体中总氨氮(TAN)、亚硝酸氮(NO₂-N)、COD 浓度的变化进行测定。研究表明,实验结束时 A、B、C 三组大菱鲂养殖密度分别达到 30.09、41.30、60.07 kg/m²,各实验组成活率都在 95%以上。大菱鲂养殖密度对增重率的影响主要体现在研究前期,并且随着养殖密度的增加,各实验组体重差异度出现显著变化(P<0.01)。大菱鲂 A、B、C 组的饵料系数分别为 0.73、0.75、0.82,与养殖密度呈正相关。研究开始第 5 天,高密度组大菱鲂溶菌酶水平升高,20 d 后血液溶菌酶水平逐渐降低,40 d 之后显著低于低密度组。研究期间系统运行稳定,循环水养殖大菱鲂的不同密度对系统各项水质指标总氨氮(TAN)、亚硝酸氮(NO₂-N)、COD 浓度的变化有显著影响(P<0.05)。研究结果显示,随着养殖密度的升高,各项水质指标显著升高,但高密度组各项水质指标均未超过渔业水质标准所规定的浓度。

关键词 大菱鲂;循环水养殖系统;高密度;水质;生长生理

中图分类号 S963 文献标识码 A 文章编号 1000-7075(2014)05-0076-07

大菱鲂(*Scophthalmus maximus*),隶属于鲽形目、鲽科、菱鲽属,英文名 Turbot,是一种冷温性鱼类,主要分布于大西洋东北部沿岸,黑海、波罗的海和地中海也有分布。1992 年由我国水产科学研究院黄海水产研究所雷霖霖院士引入我国,俗称“多宝鱼”(雷霖霖等,2012)。大菱鲂具有抗病害能力强、生长速度快、活动量小、耗氧低以及伏底生活的特性,非常适合工厂化循环水高密度养殖,是我国最早走上工厂化养殖道路的海水鱼类(倪琦等,2010),也是我国循环水工厂化养殖的主要品种。

工厂化循环水养殖较传统流水养殖模式具有节

水、节地、排放可控和高度集约化等优点(陈军等,2009;王印庚等,2013)。封闭式循环水养殖系统,不仅是当前国际上先进养殖模式的代表,也是未来的发展方向。通过 10 余年的努力,我国海水鲽类工厂化循环水养殖系统技术已经逐步走向成熟。目前,限制工厂化循环水养殖在国内发展的因素,一方面是循环水养殖系统设备的投资大、成本高;另一方面是循环水养殖技术与系统管理技术相对滞后。科学合理的提高养殖密度不但可以提高单位产量、水资源利用率,而且可以带来高收益,能够一定程度上缓冲工厂化循环水养殖投资大的阻力,为工厂化循环水养殖的发展提供

* 国家鲽类产业技术体系(CARS-50)和山东省自然科学基金青年基金(ZR2012CQ024)共同资助。乔 玮, E-mail: qiaowei173@163.com

通讯作者:高淳仁,副研究员, E-mail: gaocr@ysfri.ac.cn

收稿日期:2013-10-22, 收修改稿日期:2014-04-16

推动力,同时可以为循环水高密度养殖管理提供参考。

国内对循环水养殖条件下氨氮、亚硝酸氮急性毒性效应(徐勇等,2006)、增氧方式(高晓田等,2007)以及不同循环水对水质影响等有系统地研究,同时,对封闭循环水系统中养殖密度对大菱鲂幼鱼生长和免疫的影响进行了研究报道(朱建新等,2011)。目前国内对大菱鲂成鱼高密度养殖的研究未见最新报道。为查明大菱鲂在当前系统水平下的最佳养殖密度、最高养殖密度以及养殖效果,作者研究了不同密度对循环水养殖大菱鲂成鱼的生长、生理以及系统水质变化的影响,旨在为大菱鲂成鱼工厂化养殖最佳密度提供科学依据,为优化工厂化循环水条件下的大菱鲂成鱼养殖密度提供参考。

1 材料与方 法

1.1 循环水养殖系统

图 1 为该系统的工艺流程。养殖池为玻璃钢圆形养殖池,直径为 4.4 m,池深 1 m,水深 0.6 m、池底锥形。循环水系统采用弧形筛作为第 1 级过滤装置,每个养殖池单独配备 1 个。第 2 级过滤装置为气浮净化池蛋白质分离器,配备 1 台额定功率为 2.20 kW 的鼓风机。生物滤池为浸没式生物滤池。第 1 级滤料为比表面积为 200 m²/m³ 的 BIO-BLOK 生物包,第 2 级滤料为比表面积为 100 m²/m³ 的立体弹性滤料,3、4 级

曝气生物滤池选用比表面积为 380m²/m³ 的多孔网状生物填料。3 种滤池滤料有机结合即不影响滤料的通透性,又能提供足够大的比表面积使足够数量的异养菌附着。另外,循环水养殖系统于生物滤池后设置 H 型紫外线垂直消毒装置,内置 20 支 0.022 kW 的紫外线灯管。本研究开始前,生物滤池中滤料挂膜已经完成。

1.2 材 料

实验于 2013 年 1 月 27 日-5 月 28 日在山东莱州明波水产有限公司循环水养殖车间进行,为期 120 d。试验用大菱鲂由山东莱州明波水产有限公司提供,为同一批次的苗种,试验初始体重为(580.9±44.65) g,共计 1710 尾,实验用鱼暂养 10 d 后,按实验设计密度分池开始实验。

1.3 实验设计

研究初期,密度梯度设计为 A 组 370 尾,平均养殖密度为 14.30 kg/m²;B 组 530 尾,平均养殖密度为 20.49 kg/m²;C 组 810 尾,平均养殖密度为 31.32 kg/m²。实验开始之后的第 1、5、10、20、40、100、120 天采集血样用于各项生理指标的测定。实验开始前 10 d 每天监测水质,之后每隔 5 d 测定 1 次亚硝酸氮(NO₂⁻-N)、总氨氮(TAN)和化学需氧量(COD),水样采样点分别为水质优化池、各组出水口,取样时间为 07:30,取样当天完成测定。期间取样并测定 4 次各

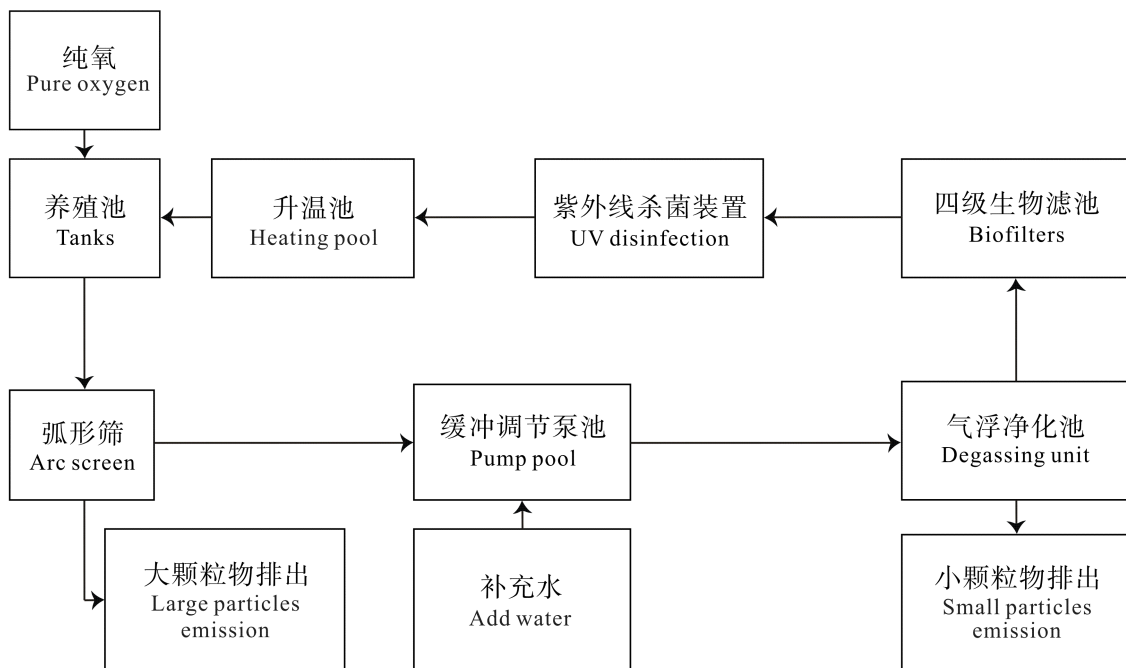


图 1 大菱鲂循环水养殖系统工艺流程

Fig. 1 Water treatment process of the closed recirculation aquaculture system of *S. maximus*

池进水口、出水口细菌、弧菌总数。每 20 d 测定 1 次各实验组大菱鲂生物学指标,包括全长、体长、体高、体重。实验期间系统日循环率保持在 20 次,每天换水量低于 5%。

1.4 日常管理

实验期间每天投喂 1 次(08:00),投喂率约占体重的 0.7%–0.8%,投喂量以达到 70%–80% 饱为准,每 5–10 d 酌情停食 1 d。投喂前以及投喂后 20 min 分别进行抽底排污,并及时冲洗弧形筛、清理蛋白质分离器。详细记录投喂量以及大菱鲂的摄食与活动情况,一旦发现摄食异常、白便、腹水等症状,及时查明原因,并采取药浴以及药饵等相应措施。每天监测并记录养殖池的 pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、水温(T)等水质指标。

1.5 水质测定与分析方法

总氮的测定采用次溴酸钠氧化比色法,亚硝氮采用盐酸萘乙二胺分光光度法,仪器设备为 7230G 型分光光度计;化学需氧量(COD)采用碱性高锰酸钾法;溶解氧、盐度、pH 值、水温、氧化还原电位等水质数据测定使用 YSI 多参数水质分析仪(Professional plus);细菌、弧菌数量采用平板计数法测定。

1.6 大菱鲂生物学指标测定方法

1.6.1 体长、体重测量方法 鱼体长用精度为 1 mm 的量鱼板测量,体重使用精度为 1 g 的电子天平测量。

1.6.2 计算方法

成活率: $SR(\%)=100 \times N_f/N_i$

增重率: $WGR=(W_n-W_{n-1})/W_{n-1} \times 100\%$

特定生长率: $SGR=(\ln W_n - \ln W_{n-1})/t \times 100\%$

饵料系数: $FCR=C/(W_n-W_{n-1}) \times 100\%$

式中, N_i 为初始个体数; N_f 为最终个体数; W_{n-1} 为前次鱼体湿重(g); W_n 为当次鱼体湿重(g); t 为实验时间(d); C 为摄食量(g)。

1.6.3 生理指标及测定方法 取样当天停食,最短时间内采集血液样品,避免大菱鲂在空气中暴露时间

过长,用 1 ml 医用注射器从大菱鲂尾动脉取血,血样静置 0.5 h 后在 4℃ 以 3000 r/min 离心 10 min,所得血清置于 -20℃ 冻存用于各项生理指标的测定。

溶菌酶测定参照 Parry 等(1965)的方法,所用试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.7 数据处理

采用 SPSS17.0 统计软件对所采集的数据进行差异显著性分析。计算测定数据平均值、标准误差,以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, $P < 0.01$ 作为差异极其显著水平。

2 结果

实验在进行到第 120 天之后,高密度实验 C 组最终养殖密度达到 60.07 kg/m²。实验进行到第 100 天后,高密度组开始出现摄食状态不佳,少数大菱鲂伏底困难,并在接下来的 20 d 相继出现 10 尾没有明显病症的大规格死鱼,同时氮氮、亚硝酸氮浓度开始缓慢升高,因此在研究进行到 120 d 时结束。A 组与 B 组最终养殖密度分别达到 30.09 kg/m²、41.30 kg/m²,两组大菱鲂摄食状态良好,氮氮、亚硝酸氮以及 COD 浓度维持在较低的水平。

2.1 大菱鲂的生物学指标

2.1.1 不同养殖密度下大菱鲂的成活率 从表 1 中可以看出, B 组成活率最高为 96.04%, 其次是 C 组为 95.68%, A 组最低为 94.69%。各组成活率的降低主要在前 20 d, 因为大菱鲂对环境的不适应导致对体质较弱个体的淘汰。在第 100 天之后高密度组成活率下降幅度较大, 主要是因为密度达到 54.73 kg/m² (第 100 天)之后,没有明显病症的大规格大菱鲂开始出现死亡。在表 1 中还可以看出,各实验组饵料系数分别为 0.73、0.75、0.82, 随着养殖密度的增大, 饵料系数呈上升趋势。

2.1.2 不同养殖密度下大菱鲂生长情况 从图 2 可以看出, A 组与 B 组增重率一直比较稳定, C 组在

表 1 实验期间各组大菱鲂养殖密度, 生长指标、饵料系数的变化
Tab. 1 The stocking density, growth factor and feed coefficient of *S. maximus* during experiment

组别 No.	初始养殖密度 Initial density (kg/m ²)	最终养殖密度 Final density (kg/m ²)	增重率 WGR (%)	成活率 SR (%)	饵料系数 FCR
A	14.30	30.09	119.56	94.69	0.73
B	20.49	41.30	109.60	96.04	0.75
C	31.32	60.07	104.03	95.68	0.82

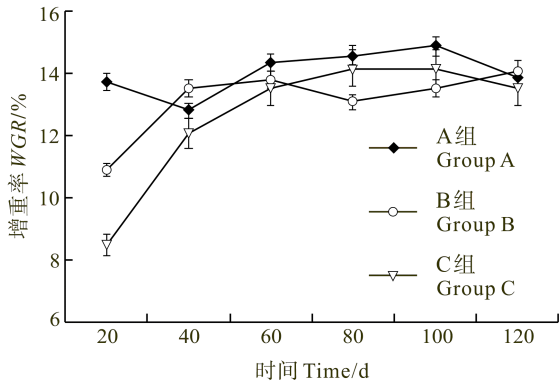


图 2 不同养殖密度下大菱鲂的增重率

Fig. 2 The changes in WGR of *S. maximus* under different density

40 d 较低,之后逐渐稳定,各组之间增重率相互交叉,差异不大,可以看出高密度养殖对增重率的影响主要在实验开始前 5 d。特定生长率的变化趋势与增重率变化趋势基本一致。另外,实验结束时,各组体重分布范围分别为 A 组 1171–1323 g、B 组 1162–1297 g、C 组 1039–1311 g,实验组 C 体重分布范围最大,实验组 A 体重范围分布最小,说明大菱鲂的生长差异度跟养殖密度正相关,同时可以看出各组大菱鲂最终体重与养殖密度呈负相关。

2.1.3 不同养殖密度下溶菌酶水平 循环水条件下不同养殖密度对大菱鲂血清溶菌酶浓度变化如图 3 所示,在试验期间,低组溶菌酶浓度略有起伏,其他两组密度组在实验前期均先上升再下降,B 组下降缓慢,C 组下降快,在 20 d 时已经显著低于 A 组水平($P<0.05$)。研究结束时,B 组溶菌酶水平也出现下降趋势。

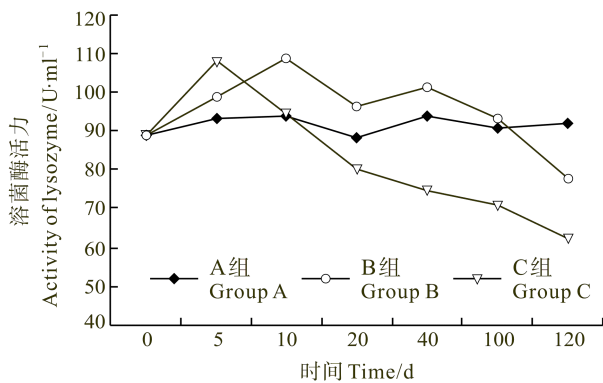


图 3 不同养殖密度下大菱鲂的溶菌酶变化

Fig. 3 The changes in lysozyme activity in of *S. maximus* under different density

2.2 水质指标

2.2.1 不同养殖密度对水体中总氮(TAN)浓度的影响 从图 4 可以看出,在整个研究过程中,总氮

浓度不断波动,总体略有升高,但不同实验组 TAN 变化趋势基本一致。养殖密度越高,养殖池出水口 TAN 浓度越高,各组之间差异显著($P<0.05$)。在实验开始后,TAN 缓慢积累,到 20 d 之后基本稳定,研究进行到第 95 天之后有升高趋势。整个实验过程中,进水口 TAN 浓度维持在 0.2–0.3 mg/L,可见系统能够有效的降低养殖水体中 TAN 的浓度。

C 组出水口 TAN 浓度显著高于其他两组,平均浓度为(0.44±0.057) mg/L,在研究结束时达到最高为 0.52 mg/L。本研究 3 个密度组 TAN 浓度范围基本保持在 0.2–0.5 mg/L 内,与苏柯等(2003)的研究结果基本一致。在实验第 80–95 天时,总氮(TAN)浓度有下降趋势,之后又缓慢升高,这可能是由于第 80 天对大菱鲂高密度组进行预防性药浴而大量换水所致。

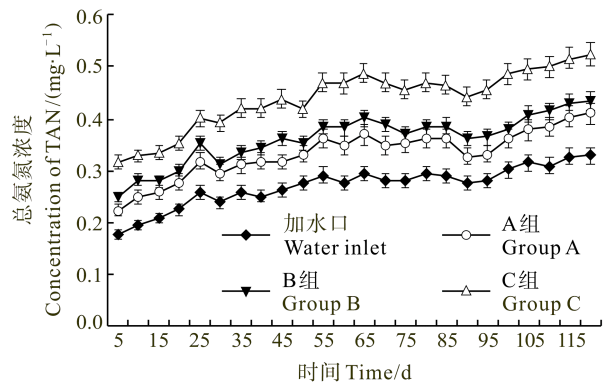


图 4 不同养殖密度下循环水系统中 TAN 的比较

Fig. 4 The changes in TAN in the system under different density

2.2.2 不同养殖密度对水体中亚硝酸氮(NO₂⁻-N)浓度的影响 从图 5 可以看出 NO₂⁻-N 与氨氮浓度变化趋势大致相同,养殖密度越高出水口 NO₂⁻-N 浓度越高,并且各组之间差异显著($P<0.05$)。实验开始前期 NO₂⁻-N 持续积累,进行到 50 d 之后达到稳定,高密

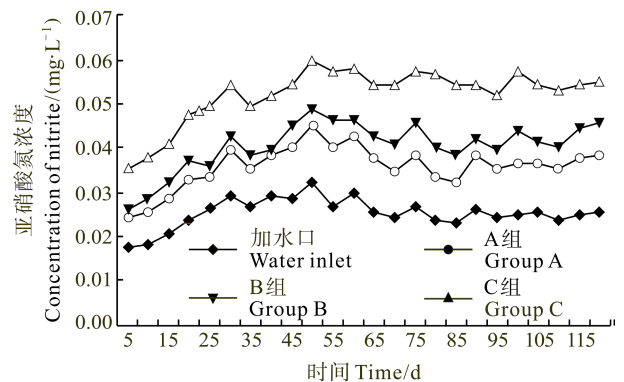


图 5 不同养殖密度下循环水系统中 NO₂⁻-N 的比较

Fig. 5 The changes in NO₂⁻-N in the system under different density

度实验组 C 出水口 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度最高, 平均为 (0.05 ± 0.0064) mg/L, 在第 75 天达到最高为 0.058 mg/L。A 组和 B 组基本保持在 0.04 mg/L 以下, 进水口 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度维持在 0.02–0.03 mg/L, 可见系统可以有效处理养殖水体中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 。

2.2.3 不同养殖密度对水体中化学需要量 COD 浓度的影响 从图 6 中可以看出, 在不同养殖密度下, 各组出水口 COD 浓度变化趋势与 TAN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 大致相同, 在研究开始的前 20 d 缓慢积累, 之后有高低波动, 但总体比较稳定。C 组出水口 COD 浓度范围在 1.7–2.2 mg/L 之间, 在研究结束时都达到最高。C 组与 B 组的 COD 浓度差异显著 ($P < 0.05$), B 组与 A 组差异不显著 ($P > 0.05$)。

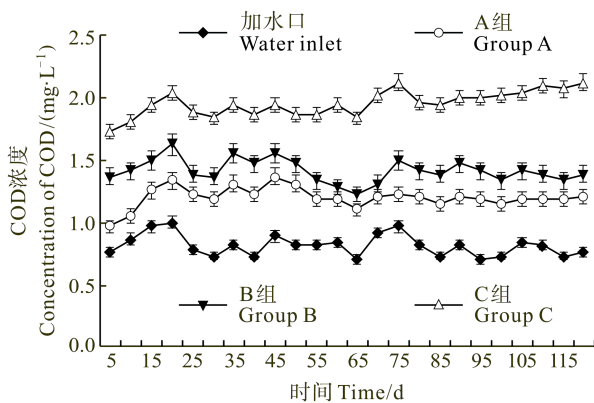


图 6 不同养殖密度下循环水系统中 COD 的比较

Fig. 6 The changes in COD in the system under different density

2.2.4 不同养殖密度对养殖水体中细菌数的影响

从表 2 中可以看出, 研究期间各组进水口细菌弧菌 (*Vibrio*) 数维持在很低的水平, 平均处理率较高, 其中进水口细菌密度最高不超过 11 ind/ml, 弧菌密度最高不超过 7 ind/ml, 说明系统在整个研究过程中运行稳定。A 组出水口细菌数和 B 组出水口细菌数差异显著 ($P < 0.05$), B 组 C 组差异不显著 ($P > 0.05$), 各组出水口弧菌数差异显著 ($P < 0.05$)。由此可见, 随着养殖密度的升高, 会明显影响水体内细菌、弧菌数量。

表 2 大菱鲆在不同养殖密度下进出水口的细菌、弧菌数
Tab. 2 The number of bacteria and *Vibrio* under different density

Inlet 进水口	细菌 Bacteria(ind/ml)			Inlet 进水口	弧菌 <i>Vibrio</i> (ind/ml)		
	A	B	C		A	B	C
0	1000	2000	30000	0	0	0	0
5	100	2500	7300	7	400	2400	10000
0	1300	2400	2000	5	1000	16000	43000
11	1100	2800	12000	0	100	1700	14000

3 讨论

3.1 不同养殖密度对大菱鲆生长的影响

大菱鲆是我国工厂化循环水养殖的主要品种, 循环水养殖大菱鲆能实现高密度养殖与大菱鲆活动量小、耗氧量低以及其底栖生活特性有关。目前, 国内工厂化循环水养殖大菱鲆密度一般为 25–30 kg/m², 最高可达到 50 kg/m² 左右(倪琦等, 2010)。本研究中, 高密度组最终养成密度达到 60.07 kg/m²。

Irwin 等(1999)、黄宁宇等(2005)研究了养殖密度对大菱鲆幼鱼以及瓦氏黄颡鱼幼鱼生长的影响, 结果表明, 较高的养殖密度鱼类的生长速度较慢, 成活率较低, 这与本研究结果不同。本研究中各组成活率均在 95% 以上, 高密度养殖对大菱鲆成鱼增重率的影响不明显, 一方面可能是由于采用了比较先进的水处理工艺, 且试验车间相对较小, 能够及时、频繁的进行日常管理, 保证系统运行稳定, 没有造成大量死亡; 另一方面, 可能是因为研究对象是 500 g 以上的成鱼, 环境适应能力较强, 不易受到不良环境因素影响。而在实验前期高密度组增重率较低, 主要是由于高密度养殖组适应环境所需的时间较长造成的。同时有研究表明, 鱼类养殖密度达到一定程度之后, 鱼类个体之间相互胁迫, 种群内个体争夺有限的食物资源, 使小个体不能够获得充足的食物, 会导致个体间的生长差异, 提高密度养殖会导致大菱鲆个体之间的差异变大(朱建新等, 2011; Irwin *et al*, 1999), 与本研究结果一致。

3.2 不同养殖密度对大菱鲆生理的影响

溶菌酶是一种水解酶, 具有抗菌活性, 在抵御外来病原菌方面发挥着重要作用, 溶菌酶浓度降低会影响鱼类机体非特异性免疫。有研究表明, 鱼体受到急性胁迫后, 常伴随有血液溶菌酶水平的升高(Demers *et al*, 1997), 而慢性胁迫会导致溶菌酶活性降低(Yin *et al*, 1995)。在本研究中, 高密度组在实验前期溶菌酶活性升高, 可以看作是急性胁迫导致的溶菌酶的浓度升高, 而经过 20 d 之后, 逐渐回落, 并在 40 d 之后显著低于低密度组, 这可以看作是慢性胁迫导致的溶菌酶浓度降低, 这与王文博等(2004)对于拥挤胁迫对鲫鱼血液溶菌酶水平的变化的研究结果一致。但是也有研究表明, 胁迫后鱼体血液溶菌酶水平是先降后升的(Roed *et al*, 1993)。这些不同的研究结果表明, 鱼体在受到胁迫后溶菌酶水平变化情况可能受到诸多因素的影响, 如胁迫的类型、强度以及时间等。所以, 当比较溶菌酶活性时, 还需进一步考虑以上因素。

在本研究中, 随着养殖密度的提高, 大菱鲆的饵

料系数逐渐变大,种群间的个体差异度增大,溶菌酶浓度降低,以及在实验进行到100 d之后高密度组出现摄食状态不佳,甚至出现无明显病症的死鱼,由此可见,高密度养殖对大菱鲂生理有负面影响。

3.3 不同养殖密度对系统水质的影响

高晓田等(2007)研究了纯氧充气对大菱鲂生长及水质指标的影响,pH值变化范围在7.62–8.03之间,平均为7.76±0.01。本研究中,实验A、B组pH值的范围与以上数据相当。高密度组pH值变化范围在7.5–7.65之间,平均为7.59±0.3,pH值相对较低,可能是因为养殖密度较高,生物净化负荷大,氨氮降解时消耗了更多的碱度,导致pH值降低,但是pH始终在《无公害食品大菱鲂养殖技术规范》(NY/T5153-2002)规定的范围内,符合大菱鲂生长的要求。

氨氮浓度过高会造成大菱鲂体内离子调节失去平衡,导致鱼惊厥、抽搐甚至死亡,因此氨氮积累是工厂化循环水养殖模式下提高养殖密度的最大限制因素之一(Eddy *et al.*, 2005)。本研究中,进水口TAN浓度范围在0.18–0.32 mg/L之间,平均浓度为(0.25±0.04) mg/L。随养殖时间各组出水口总氨氮水平略有上升趋势。国内相关研究表明,封闭式水循环系统进水口TAN水平稳定在0.3 mg/L以下(苏柯等 2003),与本研究中加水口TAN浓度基本一致。C组出水口TAN浓度显著高于其他两组,平均浓度为(0.44±0.057) mg/L,在研究结束时达到最高为0.52 mg/L。采用《海水水质标准》(GB 3097-1997)规定的换算公式求得非离子态氨氮浓度低于0.02 mg/L,未超过渔业水质标准所规定的浓度。

高浓度的亚硝酸盐会导致鱼体血液中的血红蛋白转化成高铁血红蛋白,使其失去携带氧的功能,从而引起排泄功能紊乱等一系列不良生理变化,最终导致鱼类死亡(Jensen *et al.*, 2003)。本研究中,进水口NO₂-N浓度范围为0.017–0.029 mg/L,循环水处理系统能够保证水质。C组出水口NO₂-N浓度最高,最高达到0.060 mg/L,与苏柯等(2003)研究测得的亚硝酸浓度为0.02–0.1 mg/L相比,相对较低,主要是因为本研究采用纯氧增氧,处于过饱和状态的溶解氧对保持水体NO₂-N浓度处于较低水平起了重要作用。与曲克明等(2007)对过饱和和溶解氧条件下亚硝酸盐大菱鲂的急性毒性效应的研究结果相比,该浓度在48 h LC₅₀值以下,因此,没有对大菱鲂存活率以及增重率造成显著影响。

COD指标高低是水中有机质多少的一个标志,水体中有机质过多容易导致水质恶化,降低有机质含量,对保持良好水质有重要的意义。田喆等(2010)研究了不同水循环率对大菱鲂生长和水质的影响,COD

浓度范围为3.0–4.0 mg/L,本研究期间进水口COD浓度保持在1.0 mg/L以下,较田喆等(2010)的研究较低。主要原因一方面是因为本研究取样时间在每天投喂饵料之前,残饵,粪便在经过1 d的处理之后浓度已经较低,另一方面纯氧增氧能够促进水体中有机质的分解,有效的降低COD浓度。C组出水口COD浓度范围在1.7–2.2 mg/L之间,明显高于其他两组,但未超过渔业水质标准所规定的浓度。

整个研究期间,各组进水口细菌弧菌数维持在很低的水平,平均处理率基本都在99.9%以上,说明在整个研究过程中系统运行稳定。在研究后期,高密度组进、出水口细菌显著增加,虽然没有引起疾病暴发,但是随着养殖密度的提高,大菱鲂个体之间相互胁迫加强,细菌数的增加会对养殖鱼类形成潜在的威胁,一旦暴发就会对养殖鱼类造成极大的危害,甚至死亡,所以要做好预防疾病暴发的准备。

4 结论

1) 大菱鲂成鱼高密度养殖导致大菱鲂饵料系数升高,个体之间体重差异扩大以及溶菌酶活力降低等; 2) 大菱鲂成鱼高密度养殖导致循环水系统水质各项指标明显升高,但是由于循环水处理系统采用纯氧增氧且运行稳定,对大菱鲂增重率以及存活率影响不明显; 3) 由于水处理系统比例较大且采用纯氧增氧,各项指标均未超过渔业水质标准所规定的浓度。从养成结果看,工厂化循环水大菱鲂成鱼养殖密度能够达到60.07 kg/m²,工厂化循环水大菱鲂高密度养殖具有可行性。另外,对于工厂化循环水大菱鲂高密度养殖对于大菱鲂各项生理指标如皮质醇、生长激素的影响以及高密度养殖下大菱鲂的动物福利等尚待进一步研究。

参 考 文 献

- 王文博, 汪建国, 李爱华, 等. 拥挤胁迫后鲫鱼血液皮质醇和溶菌酶水平的变化及对病原的敏感性. 中国水产科学, 2004, 11(5): 408–412
- 王印庚, 陈君, 潘传燕, 等. 鲆鲽类循环水养殖系统中病原菌的分布及杀灭工艺. 渔业科学进展, 2013, 34(2): 75–81
- 田喆, 张延青, 刘鹰, 等. 不同水循环率对大菱鲂生长和水质的影响研究. 渔业现代化, 2010, 37(6): 1–5
- 李玉全, 张海艳, 李健, 等. 微米纯氧气泡增氧技术养殖大菱鲂效果初探. 渔业现代化, 2008, 35(1): 42–44
- 陈军, 徐皓, 倪琦, 等. 我国工厂化循环水养殖发展研究报告. 渔业现代化, 2009, 36(4): 1–7
- 陈苏维, 朱文东. 影响鱼类免疫防御能力的环境胁迫因素及机制. 湖北农业科学, 2007, 46(6): 987–989
- 朱建新, 赵霞, 曲克明, 等. 封闭循环水系统中养殖密度对大

- 菱鲆生长和免疫的影响. 渔业现代化, 2011, 38(4): 1-5
- 曲克明, 徐勇, 马绍赛, 等. 不同溶解氧条件下亚硝酸盐和非离子氨对大菱鲆的急性毒性效应. 海洋水产研究, 2007, 28(4): 83-88
- 苏柯, 张和森, 肖保强, 等. 封闭式循环海水系统大菱鲆高密度养殖研究. 渔业现代化, 2003, 30(5): 9-12
- 倪琦, 雷霖霖, 张和森, 等. 我国鲆类循环水养殖系统的研制和运行现状. 渔业现代化, 2010, 37(4): 1-9
- 高晓田, 马爱军, 陈超, 等. 纯氧充气对大菱鲆生长及水质指标的影响. 海洋水产研究, 2007, 28(4): 110-117
- 徐勇, 张修峰, 曲克明, 等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和氨氮对半滑舌鲷的急性毒性效应. 海洋水产研究, 2006, 27(5): 28-33
- 黄宁宇, 夏连军, 么宗利, 等. 养殖密度和温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长影响实验研究. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2005, 24(3): 208-212
- 雷霖霖, 刘新富, 关长涛, 等. 中国大菱鲆养殖 20 年成就和展望——庆祝大菱鲆引进中国 20 周年. 渔业科学进展, 2012, 33(4): 123-130
- Demers NE, Bayne CJ. The immediate effects of stress on hormones and plasma lysozyme in rainbow trout. *Developmental & Comparative Immunology*, 1997, 21(4): 363-373
- Eddy FB. Ammonia in estuaries and effects on fish. *J Fish Biol*, 2005, 167(6): 1495-1513
- Irwin S, O'Halloran J, FitzGerald RD. Stocking density, growth and growth variation in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* (Rafinesque). *Aquaculture*, 1999, 178(1): 77-88
- Jensen FB. Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2003, 135(1): 9-24
- Parry RM, Chandan RC, Shahani KM. A rapid and sensitive assay of muramidase. *Proc Soc Exp Biol Med*, 1965, 119(2): 383-386
- Røed KH, Larsen HJS, Linder RD, *et al.* Genetic variation in lysozyme activity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 1993, 109(3-4): 237-244
- Yin Z, Lam TJ, Sin YM. The effects of crowding stress on the non-specific immune response in fancy carp (*Cyprinus carpio* L.). *Fish Shellfish Immunol*, 1995, 5(7): 519-529

(编辑 陈严)

Effects of Stocking Density on the Growth and Physiology of Adult Turbot and Changes in Water Quality

QIAO Wei¹, SONG Xiefu¹, GAO Chunren², LIU Bin², LEI Jilin², ZHAI Jieming³

(1. Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003; 2. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Shandong Laizhou Mingbo Fisheries Limited Company, Yantai 264000)

Abstract To investigate the effects of various densities on the growth, physiology and water quality of adult turbot in a recirculating aquaculture system, the adult turbot with the initial average weight (580.9±44.65) g were cultivated at one of the following three stocking densities: low (14.30 kg/m², Group A), medium (20.49 kg/m², Group B), and high (31.32 kg/m², Group C) for 120 days. The survival rate, weight change, food coefficient and blood lysozyme level, as well as the changes in total ammonia (TAN), nitrite nitrogen (NO₂-N), and COD in aquaculture water were measured. The results showed that the stocking densities of A, B and C group were 30.09 kg/m², 41.30 kg/m² and 60.07 kg/m², respectively at 120 days. The survival rates of three groups were all over 95%. The net weight gain in each group varied significantly ($P < 0.01$) with the highest in Group C. Feed conversion rates (FCR) of cross the three groups were 0.73, 0.75 and 0.82, respectively, which were positively associated with stocking density. Blood lysozyme level in Group C was increased at 5 d; it began to decline at 20 d and then decreased markedly at 40 d compared with that in Group A ($P < 0.01$). During the entire experiment, the recirculating aquaculture systems were stable and the stocking densities had significant effects on the TAN, NO₂-N and COD of water quality index ($P < 0.05$). The increase of the stocking density significantly increased water quality indexes; however, it did not exceed the fishery water quality standards.

Key words Turbot; Re-circulating aquaculture systems; Stocking density; Water quality; Growth performance and physiology