

流速对封闭循环水养殖大菱鲂生长、摄食及水质氮素的影响

孙国祥^{1,2}, 李 勇¹, 田 喆³, 刘 鹰¹, 高婷婷¹, 柳 阳^{1,2}, 刘佳亮⁴

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033, 4. 山东东方海洋科技股份有限公司, 山东 烟台 264003)

摘要: 在封闭循环水高密度养殖条件下(平均密度 $14.1 \text{ kg/m}^2 \pm 0.51 \text{ kg/m}^2$), 设置4个流速梯度(200, 400, 600, 800 L/h, 分别以 A~D 组表示), 挑选相近体质量($200.3 \text{ g} \pm 7.6 \text{ g}$)的大菱鲂进行 42 d 养殖试验, 每个梯度设置 3 个重复, 每个重复 55 尾鱼, 研究流速对封闭循环水养殖大菱鲂生长、摄食以及水质氮素的影响。试验结果表明: (1) 大菱鲂(*Scophthalmus maximus* L)特定生长率、增质量率、摄食量随流速增大先快速上升后缓升趋稳, 饲料系数则相反。B、C、D 3 组特定生长率、摄食量分别显著高于 A 组 30.77%~52.31%、17.30%~22.05%; 饲料系数则显著低于 A 组 13.83%~22.34%; (2) 养殖水体中总氮、非离子氨及亚硝酸氮浓度随流速的增大先快速下降后缓降趋稳。B、C、D 3 组水质总氮浓度均显著低于 A 组 53.70%~79.07%; (3) 根据流速对特定生长率、水体总氮二者的影响, 得出养殖的生态适宜流速为 625 L/h。再结合流速对水循环动力的影响, 得出养殖的生态经济适宜流速为 480 L/h。

关键词: 封闭循环水; 流速; 摄食; 生长; 水质; 大菱鲂(*Scophthalmus maximus* L)

中图分类号: S967.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)05-0053-08

近 10 年来, 水产养殖对环境的影响日益引起关注^[1], 特别是传统的不受约束的水产养殖模式具有水资源浪费、环境污染等负面影响。封闭循环水养殖用水率是普通流水养殖的 1/80~1/25, 且污染物通过处理可降低至最小限度, 既减少了废物排放, 又实现了资源的重复利用^[2]。鱼类排泄氮和过量投喂后的残饵是循环水养殖水体污染的主要来源^[3]。因此, 精准投喂饲料和减少鱼体排氮对减轻循环水养殖水处理负荷、保持水环境稳定具有重要意义^[4]。目前封闭循环水养殖模式, 在西方发达国家达到广泛应用^[5], 但在中国还处于初级阶段。适合中国国情的封闭循环水养殖关键生产技术与工艺, 还需进一步深入研究和开发。

国外已有关于流速对大西洋鲑鱼(*Salmo salar* L.)^[6]、虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)^[7]生长影响的报道, 国内也有关于流速对红鳍银鲫(*Barbodes schwanenfeld*)耗氧率^[8]、西伯利亚鲟(*Acipenser baer*)幼鱼生长^[9]影响的报道, 但其养殖模式均为开放式普通流水养殖, 而关于封闭循环水条件下流速对鱼类生长、摄食等影响的研究尚未见有报道。

本研究在封闭循环水养殖条件下, 试验探寻了不同流速对高密度养殖大菱鲂(*Scophthalmus maximus* L)生长、摄食及水质氮素的影响, 确定了养殖的生态

适宜流速与生态经济适宜流速, 为现代工厂化养殖大菱鲂兼顾生长性能、水质污染、动力耗费等因素而确定适宜流速, 提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验饲料选用进口优质海水鱼膨化饲料, 饲料营养水平测定如下: 干物质 95.21%, 粗蛋白 53.01%, 钙 5.21%, 总磷 3.43%, 粗脂肪 13.68%, 粗灰分 15.18%。

1.2 实验设计与动物分组

采用单因素随机实验设计, 设置 4 个流速梯度(200, 400, 600, 800 L/h, 分别以 A~D 组表示), 每个梯度设 3 个重复, 每个重复 55 尾鱼。实验用大菱鲂选自山东东方海洋科技股份有限公司开发区养殖基地, 经消毒处理后, 置于循环水系统中驯化 2 周, 挑

收稿日期: 2011-01-24; 修回日期: 2011-03-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(2006AA100305); 国家农业科技成果转化资金资助项目(2008GB2C100109)

作者简介: 孙国祥(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事水产动物生态营养与清洁饲料研究, E-mail: sunguoxiang2008@hotmail.com; 李勇, 通信作者, 电话: 0532-82898724, E-mail: lyzhy678@hotmail.com

选相近体质量(200.3g ± 7.6 g)的大菱鲆 660 尾, 随机分配到各实验组中。

1.3 养殖管理

实验于 2009 年 12 月 ~ 2010 年 1 月在山东东方海洋科技股份有限公司开发区养殖基地进行, 共计 42 d。封闭循环水系统由固液分离装置、生物过滤装置、消毒增氧装置、有机物去除装置、控温装置、养殖桶组成。养殖桶内水体积为 400 L, 底面积 0.8 m², 养殖密度为(14.1±0.51)kg/m²。试验期间温度(15.0±0.3)℃, 盐度 23±1, pH 为 7.20 ~ 7.50, 溶解氧(DO)>6.00 mg/L。试验期间光照周期为 12 h(黑暗):12 h(光照)。每天投喂 2 次(8:00,20:00), 每次进行饱食投喂, 半小时后捞出养殖桶内残饵, 计算残饵量及实际摄食量。每次投喂后排出 25%(100L)养殖水并及时添加新水。

1.4 指标测定

试验开始和结束时, 停食 1 d, 称质量, 按公式计算增质量、增质量率、特定生长率、饲料系数、存活率及摄食量。

1.4.1 生长、摄食、饲料转化指标计算

增质量(g)=末质量-始质量

增质量率(%)=(末质量-始质量)/始质量 × 100

特定生长率(%/d)=100×(Ln 末质量-Ln 始质量)/试验天数

摄食量(g/尾)= 总摄食量/处理鱼数

饲料系数=摄食量/(末质量-始质量) × 100%

存活率(%)=末鱼数/始鱼数 × 100

1.4.2 水体氮素指标测定

水体氮素的测定分别在第 13、20、27、34、41

天进行。早晨正常投喂, 采食结束后捞出残饵, 排出 25%(100 L)养殖水并及时添加新水, 然后开始计时, 6 h 后取水样, 测定水样中总氨氮和亚硝酸氮并计算非离子氨。总氨氮(total ammonia nitrogen, 简称 TAN)测定采用纳氏试剂法^[10]; 亚硝酸氮(Nitrite, NO₂⁻-N)测定参照国家标准(GB 17378.4-1998)奈乙二胺分光光度法^[11]; 非离子氨(unionized ammonia nitrogen, 简称 UIA-N)根据以下公式计算^[12]。

$$UIA = \frac{1}{1 + 10^{(pK'_a - pH + p\gamma_{H^+})}} \times 100\%$$

其中: $pK'_{a,t} = pK'_{a,25} + 0.0324 \times (25 - t)$ 。式中 t 为水温(), K'_a 为 NH₄⁺ 与 NH₃ 转化的表观平衡常数, γ_{H^+} 为活度系数。

1.5 统计分析

试验数据采用 SPSS18 软件进行单因素方差分析, 多重比较采用 LSD 和 Duncan's 进行; 采用回归分析建立多项式曲线模型; 结果数据均以“平均值 ± 标准误”表示。

2 结果

2.1 生长、摄食、饲料转化结果

2.1.1 生长性能结果

由表 1 可以看出, 在不同流速梯度下, 各组生长表现出显著性差异($P < 0.05$)或极显著性差异($P < 0.01$), 但存活率则相同(均为 100%)。末均质量、增质量、增质量率、特定生长率都随流速的增大先快速上升后缓升趋稳。末均质量、增质量方面, B、C、D 组均极显著高于 A 组($P < 0.01$)。增质量率和特定生长率方面, 与 A 组相比, B 组表现出显著性差异

表 1 不同流速对大菱鲆生长、摄食的影响

Tab. 1 Effects of different flow rates on growth and feed intake of turbot (n=3; Mean ± SE)

指标	实验组			
	A	B	C	D
初均质量(g)	200.88 ± 4.64 ^a	205.88 ± 3.15 ^a	199.15 ± 4.62 ^a	195.52 ± 2.20 ^a
末均质量(g)	264.17 ± 3.03 ^c	294 ± 4.39 ^a	298.97 ± 6.80 ^a	296.24 ± 2.48 ^a
摄食量(g/尾)	60.51 ± 1.16 ^c	70.98 ± 2.01 ^a	73.55 ± 3.11 ^a	73.76 ± 4.01 ^a
增质量(g)	63.29 ± 2.55 ^c	88.12 ± 4.30 ^a	99.82 ± 4.86 ^a	100.73 ± 0.96 ^a
增质量率(%)	31.63 ± 2.40 ^d	42.87 ± 2.90 ^{bc}	50.19 ± 3.29 ^{ab}	51.54 ± 0.78 ^a
特定生长率(%/d)	0.65 ± 0.04 ^d	0.85 ± 0.05 ^{bc}	0.97 ± 0.05 ^{ab}	0.99 ± 0.01 ^a
饲料系数	0.94 ± 0.06 ^a	0.81 ± 0.02 ^{bc}	0.74 ± 0.02 ^c	0.73 ± 0.05 ^c
存活率(%)	100	100	100	100

注: A~D 分别表示 200、400、600、800 L/h 4 个不同流速梯度; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著($P > 0.05$); 相邻字母表示差异显著($P < 0.05$); 相间字母表示差异极显著($P < 0.01$)

($P < 0.05$), C组、D组则表现出极显著性差异($P < 0.01$); B组与C组无显著性差异($P > 0.05$), 而与D组则有显著性差异($P < 0.05$); C组与D组则无显著性差异($P > 0.05$)。对流速与特定生长率进行3次回归曲线拟合, 结果见图1。

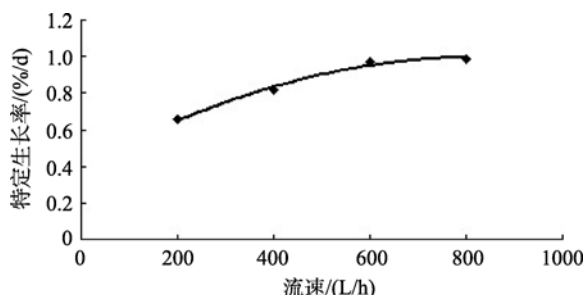


图1 不同流速对大菱鲆特定生长率的影响

Fig. 1 Effects of different flow rates on the specific growth rate (SGR) of turbot (*Scophthalmus maximus* L)

由图1可见, 特定生长率随流速加快有先增大后缓升趋于稳定的趋势, 其关系表述如下:

$$R_{SG} = -4.3 \times 10^{-10}F^3 - 4.3 \times 10^{-7}F^2 + 0.0014F + 0.4038, R^2 = 0.9997$$

其中 R_{SG} 为特定生长率, F 为流速。通过计算得出当流速为 742.29 L/h 时特定生长率取得最大值为 0.9943%/d。

2.1.2 摄食、饲料转化结果

由表1可以看出, 在不同流速梯度下, 各组间摄食量和饲料系数表现出显著差异($P < 0.05$)或极显著差异($P < 0.01$)。随流速的增大摄食量也表现出先快速上升后缓升趋稳趋势, 与生长性能变化特征相似; 而饲料系数随流速的变化规律则正好与摄食相反。B、C、D3组摄食量均极显著高于A组($P < 0.01$), 但此3组之间无显著性差异($P > 0.05$)。B、C、D3组饲料系数均显著($P < 0.05$)或极显著性($P < 0.01$)高于A组, 但此3组之间同样无显著性差异($P > 0.05$)。

试验期间大菱鲆日摄食量变化如图2所示, 不同流速下大菱鲆日摄食量呈波浪式趋势。

2.2 水质氮素结果

水质氮素测定在试验第13、20、27、34、41天进行, 水中总氮、非离子氮及亚硝酸氮浓度测定和计算结果见表2。

由表2可以看出, 随着流速的增大, 总氮、非离子氮及亚硝酸氮浓度都表现出先快速下降后缓降趋稳的趋势。与实验组A相比, B、C、D3组的总氮

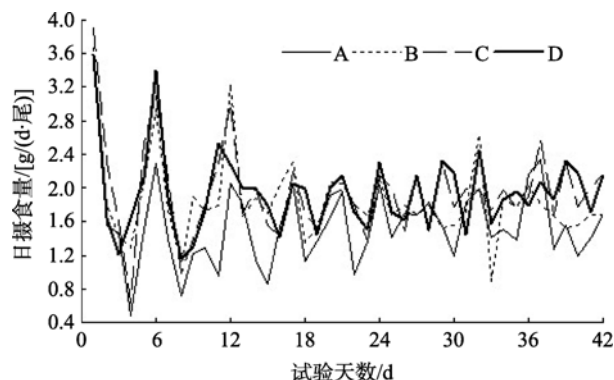


图2 试验期间大菱鲆日摄食量变化

Fig. 2 Variation of daily feed intake for turbot (*Scophthalmus maximus* L)

氮浓度都表现出显著性差异($P < 0.05$)或极显著性差异($P < 0.01$), 而B、C、D3组之间则无显著性差异($P > 0.05$)。非离子氮则随取样时间不同而有所差异: 与A相比, C、D两组都表现出极显著性差异($P < 0.01$), 而B组则在第13天、第20天表现出无显著性差异($P > 0.05$), 在第27天、34天、41天表现出显著性差异($P < 0.05$)或极显著性差异($P < 0.01$)。亚硝酸氮方面, 与A组相比, B、C、D3组都表现出显著性差异($P < 0.05$, day13)或极显著性差异($P < 0.01$, 第34天、第41天), 而B、C、D3组之间则无显著性差异($P > 0.05$, 第13天、第27天、第34天、第41天)。不同取样时间内水中总氮及亚硝酸氮浓度随流速变化如图3、图4所示。

2.3 两种适宜流速的确定

确定适宜流速, 主要应兼顾3方面, 即动物生长速度较佳、水质氮素较低、水循环动力较节省。根据本试验生长数据及试验期间总氮平均含量, 通过2次曲线拟合得出流速对水中总氮和大菱鲆特定生长率的影响如图5所示。

流速对 TAN、SGR 的影响可用如下数学表达式表示:

$$SGR = -1 \times 10^{-6}F^2 + 0.0016F + 0.4367, R^2 = 0.9915$$

$$TAN = 3 \times 10^{-6}F^2 - 0.0034F + 1.2788, R^2 = 0.9875$$

通过相关计算得出, 当 $F = 625$ L/h 时, SGR (1.0461%/d) 与 TAN (0.3258 mg/L) 的差值最大, 即在此流速下大菱鲆的特定生长率较高而同时水中总氮浓度较低, 作为大菱鲆封闭循环水养殖的生态适宜流速。

水循环动力消耗试验中, 水泵单位时间耗电量为 $E = \frac{HQ\rho gq}{3600\eta}$, 其中 H 为扬程, 单位为 m (本试验中

表 2 流速对水质总氨氮(mg/L)、非离子氨(μg/L)及亚硝酸氮质量浓度(mg/L)的影响

Tab. 2 Effects of flow rates on concentrations of TAN,UIA-N, and NO₂⁻-N in water (Mean±SE, n=3)

取样时间	水质指标	实验组			
		A	B	C	D
第 13 天	总氨氮(TAN)	0.54 ± 0.09 ^a	0.32 ± 0.03 ^{bc}	0.25 ± 0.02 ^c	0.25 ± 0.01 ^c
	非离子氨(UIA-N)	9.06 ± 0.38 ^a	8.21 ± 0.29 ^{ab}	6.98 ± 0.19 ^{cd}	6.14 ± 0.42 ^d
	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)	0.09 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.01 ^{ab}	0.06 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.01 ^b
第 20 天	总氨氮(TAN)	0.77 ± 0.10 ^a	0.29 ± 0.06 ^c	0.27 ± 0.04 ^c	0.24 ± 0.07 ^c
	非离子氨(UIA-N)	8.58 ± 0.79 ^a	7.00 ± 0.89 ^{ab}	5.81 ± 0.28 ^b	5.40 ± 0.77 ^b
	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)	0.13 ± 0.02 ^a	0.10 ± 0.01 ^{ab}	0.06 ± 0.01 ^c	0.05 ± 0.01 ^c
第 27 天	总氨氮(TAN)	0.91 ± 0.12 ^a	0.33 ± 0.04 ^c	0.21 ± 0.02 ^c	0.17 ± 0.02 ^c
	非离子氨(UIA-N)	10.31 ± 0.74 ^a	9.05 ± 0.34 ^{bc}	8.51 ± 0.42 ^c	8.38 ± 0.28 ^c
	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)	0.25 ± 0.07 ^a	0.11 ± 0.01 ^{bc}	0.05 ± 0.01 ^c	0.05 ± 0.01 ^c
第 34 天	总氨氮(TAN)	0.53 ± 0.10 ^a	0.22 ± 0.02 ^{bc}	0.18 ± 0.01 ^{bc}	0.14 ± 0.02 ^c
	非离子氨(UIA-N)	10.27 ± 0.45 ^a	8.27 ± 0.53 ^{bc}	7.78 ± 0.37 ^c	6.14 ± 0.43 ^d
	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)	0.17 ± 0.03 ^a	0.06 ± 0.01 ^c	0.06 ± 0.01 ^c	0.04 ± 0.01 ^c
第 41 天	总氨氮(TAN)	0.86 ± 0.14 ^a	0.27 ± 0.01 ^c	0.23 ± 0.04 ^c	0.18 ± 0.02 ^c
	非离子氨(UIA-N)	9.56 ± 0.17 ^a	7.92 ± 0.29 ^c	6.50 ± 0.11 ^{de}	5.70 ± 0.47 ^e
	亚硝酸氮(NO ₂ ⁻ -N)	0.24 ± 0.05 ^a	0.09 ± 0.01 ^c	0.07 ± 0.01 ^c	0.04 ± 0.01 ^c

注: A~D 分别表示 200、400、600、800 L/h 4 个不同流速梯度; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著(P>0.05); 相邻字母表示差异显著(P<0.05); 相间字母表示差异极显著(P<0.01)

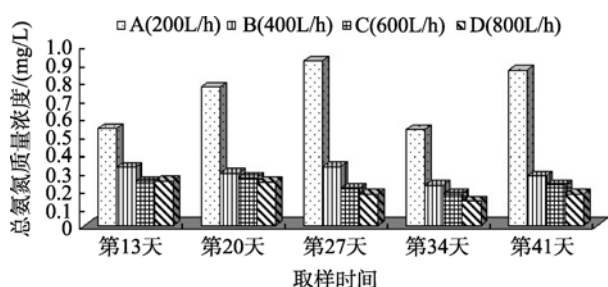


图 3 不同取样时间内流速对水中总氨氮质量浓度的影响
Fig. 3 Effects of flow rates on TAN concentration on different sample days

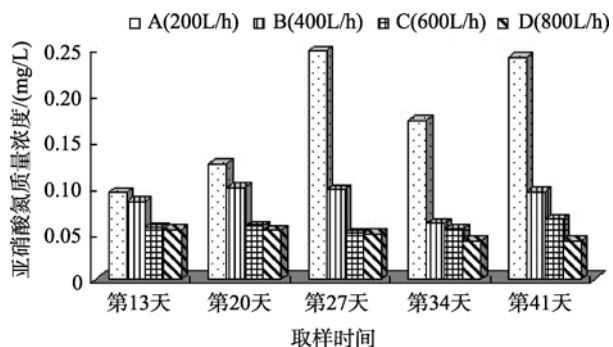


图 4 不同取样时间内流速对水中亚硝酸氮质量浓度的影响
Fig. 4 Effects of flow rates on NO₂⁻-N concentration on different sample days

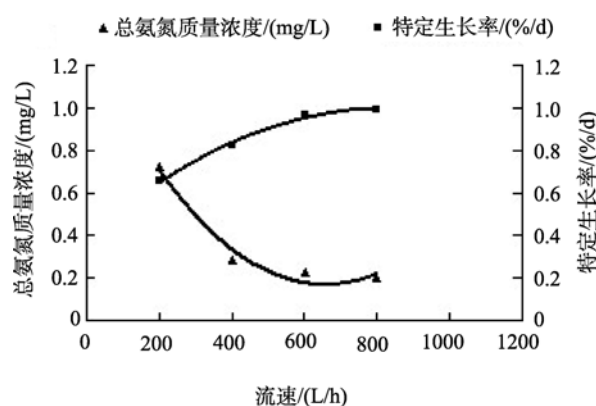


图 5 流速对水中总氨氮质量浓度和大菱鲆特定生长率的影响
Fig. 5 Effects of flow rates on TAN concentration and the SGR of turbot (*Scophthatmus maximus* L)

为 2 m); Q 为流量(流速/1000), 单位为 m^3/h ; q 为水循环率(流速/养殖水体积), 单位为 h^{-1} ; η 为输出效率 0.8; ρ 为海水密度($1030 kg/m^3$); g 为重力加速度($9.8 m/s^2$)。代入相关数据可得 $E_{\text{电能}} = 1.75 \times 10^{-5} F^2$, 将流速对水循环动力、特定生长率、总氨氮浓度 3 者影响相结合, 通过二次曲线回归得出, 当 $F=480 L/h$ 时, 大菱鲆特定生长率较高(0.97%/d)、水循环动力较小($4.03 kW \cdot h$), 同时水总氨氮较低(0.38 mg/L), 亚硝

酸氮及非离子氨符合渔业水质标准。这一流速作为大菱鲆封闭循环水养殖的生态经济适宜流速。

3 讨论

3.1 流速对大菱鲆生长的影响

国内针对流速的研究较少且研究内容差异较大。宋波澜等^[8]研究了不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化,结果表明趋流率、摆尾频率和耗氧率随流速增大表现出先增大后减小并趋于稳定的趋势。黄宁宇等^[9]报道了流速、温度对西伯利亚鲟幼鱼生长的影响,结果表明在同一温度下,鲟幼鱼的增质量、体长、生长效率、特定生长率及日增质量等指标随流速增大而增大,饲料系数则逐渐降低,其中鲟幼鱼的生长效率与流速之间存在显著正相关性。国外已有关于流速的研究, FiveIstad 等^[13]研究得出,降低流速对大西洋鲑鱼生长有明显的负作用,但流速过高同样对鱼类生长有负作用。以上前人研究结果均在开放式流水养殖条件下获得,而封闭循环水养殖条件下流速对动物生长影响的研究报道未见得。本试验结果表明,大菱鲆特定生长率随流速增加表现出先增加后趋于稳定的趋势,与水质氮素变化特征相吻合,既流速低梯度增加时,水质有害氮显著减少,大菱鲆生长性能随之增加;而流速高梯度增加,水质有害氮未有进一步减少,从而生长性能表现出差异不显著。

3.2 流速对大菱鲆摄食的影响

摄食量的多少是影响鱼类生长速度的关键因素,而鱼类的摄食量受到诸如遗传、水体环境、饲料、生长、养殖管理等因素的影响^[14]。关于封闭循环水系统流速对摄食量的影响研究报道目前还尚未见到。本试验结果表明,流速对大菱鲆摄食量的影响与其特定生长率的影响一致,即摄食量随流速的增大先快速上升后缓升趋稳,而饲料系数随流速的变化规律则正好相反。出现这一现象和规律主要与水环境、生长、密度有关。Kulczykowska 等^[15]研究了摄食节律以及环境条件对鱼类摄食的调节,认为较差的水质条件、较高的密度等会引起鱼类的应激反应,并通过神经激素调节影响鱼类的食欲进而影响摄食量。Schram 等^[16]报道了水体氨氮对非洲鲶鱼摄食、生长及血液指标的影响,较高氨氮会极显著的影响鱼类摄食以及特定生长率。本试验有害氮浓度随流速的增加表现出先降低后趋于稳定的趋势。流速 A

中有害物质总氨氮、亚硝酸氮、非离子氨含量显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)高于 B、C、D3 组,有害物质浓度过高影响鱼的食欲导致摄食量减少,进而影响鱼类生长,生长缓慢直接减少采食,双重作用,因而摄食量与生长速度显著($P < 0.05$)低于 B、C、D3 组。而 B、C 两组中有害氮浓度较低且无显著性差异,从而两组鱼的摄食量和生长受影响较小,呈现差异不显著;D 组有害氮浓度最低,因此摄食量和生长速度最高。这一结果分析与 Kulczykowska^[15]及 Schram^[16]的研究相一致。

3.3 流速对水质氮素指标的影响

生物滤器是封闭循环水养殖系统的关键组成部分,主要用于去除氨氮、亚硝酸氮、有机物、二氧化碳和增氧。Franco-Nava 等^[17]认为一定的流速会提高生物滤器的去除能力从而改善水质。傅雪军等^[18]研究了水温、进水氨氮浓度、水力停留时间对生物膜消氮效果的影响,表明氨氮去除率随水力停留时间的延长而减小。FiveIstad 等^[13]在研究中发现,水中总氨氮浓度随流速下降而上升,低流速(0.16~0.21) L/(kg/min)下总氨氮浓度比高流速(0.49-0.59) L/(kg/min)显著上升。本研究表明,水中总氨氮浓度随流速增加先速降后缓降趋稳,与生长性能和摄食量变化规律相一致。与前人研究结果有相似但不完全一致,属不同试验的梯度设计及其他条件差异所致。本试验所得结果特征及规律更加客观或符合实际,造成这一特征的原因分析是:流速低梯度增加时,循环次数增加,生物滤器硝解氮素的次数加大,水质有害氮减少;流速高梯度增加时,生物滤器硝解氮素功能趋于饱和或达到上限,因循环次数增加的氮素硝化和降解增加效应弱化,所以水中总氨氮等有害氮未有显著减少。

水中总氨氮有两种组成部分: $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 而它们之间又存在以下转化方式:

$\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{NH}_3 + \text{H}_3\text{O}^+$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 对水生生物具有很强的毒性。Foss^[19]和 Person-Le Ruyet^[20]报道了大菱鲆幼鱼的非离子氨致死质量浓度分别为 170 和 210 $\mu\text{g/L}$, 中国渔业水质标准(GB11607-89)规定非离子氨含量不得超过 0.020 mg/L (20 $\mu\text{g/L}$)。与氨氮相似,高流速同样能降低水中非离子氨含量。Schram 等^[16]的研究表明,在进水非离子氨含量相同的条件下,养殖水体中非离子氨含量随流速增大而减小。John 等^[21]研究表明,水中非离子氨含量随流速的增大表

现出先快速下降后缓降趋稳趋势,解释其原因为非离子氨浓度由 pH 及碱度决定,而水体中的游离二氧化碳含量、养殖生物氨氮排泄速率都能显著影响水体 pH,从而造成不同流速养殖水体非离子氨含量差异。本试验中,非离子氨浓度随流速变化规律与总氨氮、亚硝酸氮一致,即先快速下降后缓降趋稳,与 John 研究结果相一致,原因也类同。

在循环水养殖系统中,一般通过生物滤器的硝化作用把氨氮转化成亚硝酸氮,并进一步转化成硝酸态氮,在此转化过程中,氨氮氧化速率是限速参数^[22],而氨氮浓度、溶解氧、有机物、水流、温度、pH 等构成影响氨氮转化速率的主要因素^[23]。本研究表明,亚硝酸氮浓度随流速增大先快速下降后缓降趋稳,其变化范围为 0.04mg/L(第 41 天, D 组)~0.25 mg/L(第 27 天, A 组),这与总氨氮、非离子氨的变化趋势一致。Ling 等^[24]研究了底物浓度对硝化速率的影响,结果表明低氨氮浓度条件下可以建立一级反应动力学,即随着底物浓度的增加,硝化速率将呈线性增加。按这一理论,本试验中低流速梯度的总氨氮浓度大,其作为反应底物将促进硝化速率,导致产生较多的亚硝酸氮,而试验中测定的不同流速梯度的亚硝酸氮含量与此推断相符。Zhu 等^[25]通过相关实验证明,增大水流是一种提高固定膜生物滤器的硝化效率的有效方法,本实验结果与此相一致。曲克明等^[26]的研究表明,在封闭循环水养殖中,养殖水体更容易产生和积累亚硝酸氮。本研究结果表明,流速梯度 A 中亚硝酸氮浓度表现出明显的积累趋势,另外 3 个梯度积累趋势并不明显,造成该差异的原因为流速增加导致水体氨氮浓度降低,作为反应底物的氨氮浓度降低导致转换成的亚硝酸氮浓度降低,因此这 3 个梯度亚硝酸氮积累趋势并不明显。

3.4 具有重要实践价值的两种最适流速

流速是封闭循环水^[3]和流水养殖中^[27]的一项关键参数,因此确定适宜流速是实现养殖高效、经济的关键技术之一。国内针对封闭循环水养殖适宜流速的研究尚未见报道。国外的研究当中, Schram^[27]报到了 18 流水养殖条件下流速对大菱鲂幼鱼生长的影响,得出大菱鲂幼鱼的特定生长率最大(1.24%/d)时的流速为 921.20 L/h。Fivelstad^[6]研究得出增大流速有利于流水养殖水体中游离二氧化碳等有害物质浓度的降低。以上研究均在流水养殖模式下得出,并且只是单纯考虑流速对生长或有害代谢物的影响。

本研究首次在封闭循环水养殖条件下研究流速对 200 g 左右大菱鲂生长及水中 TAN 等有害物质的影响,并创新提出两种适宜流速指标值:基于生长较快和 TAN 浓度较小的养殖生态适宜流速(625 L/h);基于生长较快、水循环动力较节省及 TAN 浓度较小的养殖生态经济适宜流速(480 L/h)。该结果不仅丰富了封闭循环水养殖模式关键技术参数的内容和确定方法,而且对中国方兴未艾的封闭循环水养殖产业的清洁、节能、低碳等优势发挥,具有重要指导和参考价值。通过与 Schram^[27]研究比较,大菱鲂幼鱼(10 g)最大生长率时的流速与本研究中大菱鲂(200 g)最适流速有所差异,但不同流速对不同大菱鲂生长及水质的影响规律相近。因此,本研究所得最适流速具有较大的适用性。同时,关于不同体质量大菱鲂生长的最适流速有待深入研究。

参考文献:

- [1] 王瑞梅, 刘杰, 史岩. 我国水产养殖业环境污染防治研究[J]. 中国渔业经济, 2010, 5: 108-112.
- [2] 刘鹰. 海水封闭循环水养殖工程的开拓与创新[C]//刘鹰, 曲克明. 封闭循环水养殖-新理念·新技术·新方法. 北京: 中国教育文化出版社, 2009: 15-21.
- [3] 刘鹰. 欧洲循环水养殖技术综述[J]. 渔业现代化, 2006, 6: 47-49.
- [4] 王华, 李勇, 陈康, 等. 工厂化养殖半滑舌鳎生长、摄食和水质的变化特征和规律[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(4): 52-59.
- [5] Blancheton J P. Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species [J]. Aquaculture Engineering, 2000, 22: 17-31.
- [6] Fivelstad S, Bergheim A, Holland P M, et al. Water flow requirements in the intensive production of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr-smolt at two salinity levels [J]. Aquaculture, 2004, 231(1-4): 263-277.
- [7] Good C, Davidson J, Welsh C, et al. The impact of water exchange rate on the health and performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems [J]. Aquaculture, 2009, 294(1-2): 80-85.
- [8] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化[J]. 动物学报, 2008, 54(4): 686-694.
- [9] 黄宁宇, 程起群, 高露娇, 等. 流速、温度对西伯利亚鲟幼鱼生长的影响[J]. 水产学报, 2007, 31(1):

- 31-37.
- [10] 雷衍之. 养殖水环境化学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006:49-56.
- [11] 中华人民共和国标准局. GB 17378.4-1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 188-189.
- [12] 雷衍之. 养殖水环境化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 116-118.
- [13] FiveIstad S, Binde M. Effects of reduced water flow (increased loading)in soft water on Atlantic salmon smolts (*Salmo salar L.*) while maintaining oxygen at constant level by oxygenation of the inlet water[J]. *Aquaculture Engineering*, 1994, 13: 211-218.
- [14] 任洪涛, 赵淑娟. 浅析影响鱼类摄食量的因素[J]. *中国水产*, 2004, 11: 71-72.
- [15] Kulczykowska E, Vazquez F J S. Neurohormonal regulation of feed intake and response to nutrients in fish: aspects of feeding rhythm and stress [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41: 654-667.
- [16] Schram E, Roques J A C, Abbink W, et al. The impact of elevated water ammonia concentration on physiology, growth and feed intake of African catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Aquaculture*, 2010, 306: 108-115.
- [17] Franco-Nava M A, Blancheton J P, Deviller G, et al. Effect of fish size and hydraulic regime on particulate organic matter dynamics in a recirculation aquaculture system: elemental carbon and nitrogen approach [J]. *Aquaculture*, 2004, 239:179-198.
- [18] 傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 等. 循环水养殖系统生物挂膜的消氨效果及影响因素分析[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(1): 95-99.
- [19] Foss A, Imsland A K, Roth B, et al. Interactive effects of oxygen saturation and ammonia on growth and blood physiology in juvenile turbot[J]. *Aquaculture*, 2007, 271: 244-251.
- [20] Person-Le Ruyet J, Galland R, Le Roux A, et al. Chronic ammonia toxicity in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus*[J]. *Aquaculture*, 1997, 154: 155-171.
- [21] John C, Barnaby W, Michael R. Modeling carbon dioxide, pH, and unionized ammonia relationships in serial reuse systems [J]. *Aquaculture Engineering*, 2009, 40: 28-44.
- [22] McMillan J D, Wheaton F W, Hochheimer J N, et al. Pumping effect on particle sizes in a recirculating aquaculture system [J]. *Aquaculture Engineering*, 2003, 27(1): 53-59.
- [23] 石芳永, 张延青, 刘鹰. 海水生物滤器硝化动力学的研究进展[C]//刘鹰, 曲克明. 封闭循环水养殖-新理念·新技术·新方法. 北京: 中国教育文化出版社, 2009: 196-205.
- [24] Ling J, Chen S. Impact of organic carbon on nitrification performance of different types of biofilters[J]. *Aquaculture Engineering*, 2005, 33:150-162.
- [25] Zhu S M, Chen S L. Effects of air-diffusion turbulent flow on nitrification rate in fixed film biofilters: a comparison study [J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2001, 65: 240-247.
- [26] 曲克明, 徐勇, 马绍赛, 等. 不同溶氧条件下亚硝酸盐和非离子氨对大菱鲆的急性毒性效应[J]. *海洋水产研究*, 2008, 28(4): 83-88.
- [27] Schram E, Verdegem M C J, Widjaja R T O B H, et al. Impact of increased flow rate on specific growth rate of juvenile turbot (*Scophthalmus maximu*, Rafinesque 1810) [J]. *Aquaculture*, 2009, 292: 46-52.

Effects of flow rate on the growth, feed intake and water nitrogen in a closed recirculation aquaculture system of turbot (*Scophthatmus maximus* L.)

SUN Guo-xiang^{1,2}, LI Yong¹, TIAN Zhe³, LIU Ying¹, GAO Ting-ting¹, LIU Yang^{1,2}, LIU Jia-liang⁴

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China, 4. Shandong Oriental Ocean Sci-Tech Co., Ltd., Yantai 264003, China)

Received: Jan., 24, 2011

Key words: closed recirculation aquaculture system; flow rate; feed intake; growth; water quality; turbot (*Scophthatmus maximus* L)

Abstract: Effects of flow rate on the feed intake, growth and water quality of turbot culture were investigated in a closed recirculation aquaculture system. Fish with a mean initial weight of 200.3 ± 7.6 g were reared at four different flow rates (200, 400, 600, 800L/h) in 400 L tanks for 42 days. Six hundred and sixty fish were randomly allotted in four treatment groups with three replicates for each treatment at a stocking density of 14.1 ± 0.51 kg/m². Feed intake, specific growth rate and weight gain rate were increasing rapidly first and then slowly with the increase of flow rate, while food conversion rate showed a reverse pattern. The specific growth rate of group B, C, and D were significantly higher than group A by 30.77%~52.31%, while feed conversion rate was lower than group A by 13.83%~22.34%. Concentrations of total ammonia nitrogen (TAN), unionized ammonia nitrogen (UIA-N), and nitrite (NO_2^- -N) were decreased rapidly first and then slowly with the increase of flow rate. The ammonia nitrogen of group B, C, and D were significantly higher than group A by 53.70%~79.07%. The optimal ecological flow rate was calculated to be 625 L/h, based on the specific growth rate with total ammonia nitrogen in water. Another optimal ecological economical flow rate was calculated to be 480 L/h, based on the specific growth rate with power consumption and TAN in water.

(本文编辑: 谭雪静)

《海洋科学》杂志 2011 年征订启事

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性期刊，是中国自然科学核心期刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨，及时、快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等，对重大科研和应用性研究成果特别予以优先报道。主要刊载内容有：海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍（有偿刊登）等。

本刊为月刊，每月 9 日出版，大 16 开本，96 页，每期定价 30 元，全年定价 360 元。本刊国内外公开发行（国际刊号：ISSN1000-3096；国内刊号：CN37-1151/P；国内邮发代码：2-655；国外发行代号：M6666）。全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域研究的科技人员踊跃订阅。邮局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中名列前茅，订户遍及全国 20 多个省、市、自治区，影响面广，宣传力大，欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告，价格优惠。

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》编辑部地址：山东省青岛市南海路 7 号，266071

电话及传真：0532-82898755

E-mail：pxzhang@qdio.ac.cn