

放养密度对日本鳗鲡夏秋两季养殖水质及营养品质的影响

杨佳雯 高敏 陈森 张浩田 吴坤 温小波 胡雄 孙育平 宁丽军

STOCKING DENSITY ON WATER QUALITY AND NUTRITIONAL QUALITY OF *ANGUILLA JAPONICA* IN SUMMER AND AUTUMN

YANG Jia-Wen, GAO Min, CHEN Sen, ZHANG Hao-Tian, WU Kun, WEN Xiao-Bo, HU Xiong, SUN Yu-Ping, NING Li-Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0336>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

短时微流水处理对池塘养殖鳙鱼肌肉滋味品质的影响

THE EFFECT OF SHORT-TERM MICRO-FLOW WATER TREATMENT ON THE MUSCLE TASTE QUALITY OF BIGHEAD CARP CULTURED IN PONDS

水生生物学报. 2021, 45(5): 1057–1066 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.002>

长江靖江段沿岸日本鳗鲡丰度的时间格局及生物学研究

THE TEMPORAL DISTRIBUTION AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF *ANGUILLA JAPONICA* COLLECTED AT THE JINGJIANG SECTION OF THE YANGTZE RIVER

水生生物学报. 2021, 45(2): 397–404 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.003>

鲢浮游动物群落特征及水质评价

THE CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON COMMUNITY AND WATER QUALITY IN THE SHIHOUDIAN LAKE

水生生物学报. 2020, 44(6): 1313–1321 <https://doi.org/10.7541/2020.152>

沙颍河流域浮游动物群落结构空间变化特征与水质评价

THE CHARACTERISTICS OF ZOOPLANKTON COMMUNITY AND WATER QUALITY IN THE SHAYING RIVER BASIN

水生生物学报. 2018, 42(2): 373–381 <https://doi.org/10.7541/2018.048>

珠江水系鳗鲡资源空间分布特征研究

THE SPATIAL DISTRIBUTION OF *ANGUILLA JAPONICA* AND *ANGUILLA MARMORATA* IN THE PEARL RIVER

水生生物学报. 2019, 43(4): 847–853 <https://doi.org/10.7541/2019.100>

浙江水源地水库浮游动物丰度和生物量与水质参数的通径分析

PATH ANALYSIS OF ZOOPLANKTON ABUNDANCE AND BIOMASS WITH WATER QUALITY PARAMETERS IN WATER SOURCE RESERVOIRS, ZHEJIANG PROVINCE

水生生物学报. 2019, 43(1): 165–172 <https://doi.org/10.7541/2019.020>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2023.0336

放养密度对日本鳗鲡夏秋两季养殖水质及营养品质的影响

杨佳雯¹ 高 敏¹ 陈 森¹ 张浩田¹ 吴 坤¹ 温小波¹
胡 雄² 孙育平³ 宁丽军¹

(1. 华南农业大学海洋学院, 广州 510642; 2. 佛山市顺德区旺海饲料实业有限公司, 佛山 528300;
3. 广东省农业科学院动物科学研究所, 广州 510640)

摘要: 研究以日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)为研究对象, 分夏秋两季, 调查并讨论了放养密度对养殖鱼水质和营养品质变化的影响。夏季低密度组放养密度分别为1.51 (1号塘)、1.50 (2号塘)和1.49 kg/m² (3号塘), 高密度组分别为2.17 (4号塘)、2.14 (5号塘)和2.13 kg/m² (6号塘)。秋季低密度组放养密度分别为1.74 (I号塘)、1.72 (II号塘)和1.75 kg/m² (III号塘), 高密度组分别为2.36 (IV号塘)、2.34 (V号塘)和2.36 kg/m² (VI号塘)。两次分别从每个养殖塘采集5份水样, 每个密度组养殖塘随机采集4尾日本鳗鲡。结果显示: 两季高密度塘水体透明度和溶氧显著低于低密度塘($P<0.05$), 总氮、总磷、氨氮、亚硝酸盐、COD、叶绿素 a 指标显著高于低密度塘($P<0.05$), 硅藻门、绿藻门、蓝藻门密度均大于低密度塘一个数量级, 且经统计分析, 夏季高密度组的蓝藻门密度显著高于低密度组($P<0.05$)。此外, 高密度塘水体菌群Shannon指数显著低于低密度塘, Simpson指数则相反($P<0.05$)。在门水平上, 经统计分析, 夏秋两季高密度组放线菌门均显著低于低密度组($P<0.05$); 而夏季高密度组变形菌门极显著高于低密度组($P<0.01$); 秋季拟杆菌门显著高于低密度组($P<0.05$)。在营养品质方面, 日本鳗鲡肌肉的硬度、剪切力、咀嚼性、回复性参数及粗脂肪和粗蛋白含量均显著小于低密度塘($P<0.05$); 水分含量显著高于低密度塘($P<0.05$)。综上, 高密度与低密度塘相比, 水质指标、藻类组成、菌群多样性及鱼体质构、营养成分等指标中大部分参数呈现一致性负面影响, 共同构成日本鳗鲡品质与养殖环境的敏感参数。此外, 夏季日本鳗鲡放养密度为2.13—2.17 kg/m²水质呈现富营养化及轻度污染状态。

关键词: 放养密度; 营养品质; 质构; 水质变化; 日本鳗鲡

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)06-0979-12



放养密度是水产养殖中最重要的环境因子之一, 一定程度高放养密度可最大限度地提高集约化养殖模式产量, 使利益最大化。但盲目地增加养殖密度会加剧种内竞争进而影响正常摄食, 最终对水产动物的生存、生长及营养物质积累等方面均产生不利影响^[1]。此外, 在过高密度下, 鱼类能量利用加剧, 营养物质大量消耗, 导致营养组分、甚至口感品质发生改变^[2]。例如, 高密度团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)肌肉水分含量显著高于低密度, 而粗脂肪水平

显著低于低密度^[3]。类似地, 周伟等^[4]提及随着养殖密度升高, 斑节对虾(*Penaeus monodon*)的硬度、弹性、紧密性和咀嚼度都呈现出明显的降低趋势。两者均表明了过高密度对鱼营养品质产生的直接负面影响。近年来, 随着水产养殖业的发展和养殖密度的不断提高, 水体富营养化日益加剧, 藻类毒素引起的鱼虾病害和损失率也呈上升趋势^[5]。加大养殖密度的同时, 池塘有机物含量急剧升高, 而有机物是水中藻类和微生物生长和繁殖的物质基础, 适量的有机物会促进藻类生长, 而过量有机

收稿日期: 2023-10-24; 修订日期: 2023-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(32002400); 广东省科技厅乡村振兴专项资金(2021): 鳗鱼生态健康养殖策略与调控技术; 江门市科技计划项目(2020030103240009002)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32002400); Special Fund for Rural Revitalization of Guangdong Provincial Department of Science and Technology (2021); Science and Technology Program of Jiangmen, China (2020030103240009002)]

作者简介: 杨佳雯(2000—), 女, 硕士研究生; 主要从事鱼类营养与糖脂代谢。E-mail: yangjiawen200719@stu.scau.edu.cn

通信作者: 宁丽军(1986—), 男, 博士, 副教授; E-mail: ning_lijun@163.com

物则会因水中溶氧降低, 氨氮等有毒有害物质增加, 破坏菌藻生态平衡, 恶化养殖水体的水质^[6]。侯文杰等^[7]试验结果证明高密度养殖会使水体中DO (溶解氧)、pH显著下降, 而TN (总氮)、COD (化学耗氧量)则会显著升高。高密度池塘氨氮和TP (总磷)升高, 且与鱼体水分、粗脂肪含量呈正相关^[8]。氨氮和总磷本身是鱼天然饵料及水体菌群的影响因素^[9]。由此可见, 放养密度不仅本身对鱼品质造成影响, 而且其可通过水质因子影响水体微生物组成间接影响鱼生长品质。

鳗鲡(*Anguilla* sp.)俗称河鳗, 是一种肉味鲜美、营养丰富和滋补身体的上等食用鱼类, 有“水中人参”的美称, 是重要的世界性经济鱼类之一^[10]。鳗鲡蛋白水平适中, 脂肪含量极高, 其构成脂肪主要成分的脂肪酸中EPA (二十碳五烯酸)和DHA (二十二碳六烯酸)也远高于其他鱼类, 后者对人类的心脑健康极其重要^[11]。不过有研究报道, 高放养密度显著降低花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)的生长与粗脂肪水平^[12], 潜在影响其营养与经济价值。目前虽然没有放养密度对鳗鲡质构影响的研究, 但脂肪本身是影响鱼质构水平的重要因素^[13], 海鲈(*Perca fluviatilis*)、虹鳟(*Salmo gairdneri*)等多种鱼的研究中, 脂肪含量高的鱼, 质构表现也更好, 提示密度因素可能通过脂肪介导对鱼肉质构品质产生影响^[13, 14]。因此, 密度因素将不仅影响鳗鲡养殖水质与生长, 而且潜在破坏其营养与肉质, 然而相关全面系统研究却未见报道。

为此, 本研究以日本鳗鲡(*Anguilla japonica*; 后简称“鳗鲡”)为研究对象, 通过夏秋两季分别采集高低密度池塘水样和鱼样, 探求放养密度对鳗鲡水质及营养品质的影响, 以期对鳗鲡放养密度选择与养殖评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 设计分组与饲养管理

本研究以日本鳗鲡为研究对象, 夏秋两季放养密度相关数据见表1。两次均选取广东省台山市久慎水产养殖基地作为采样地点。两次采样时间为8和11月, 放苗时间4和6月, 第1次采样已养殖4个月, 第2次已养殖5个月, 均是晴天上午进行采样。池塘选址均在壤土底质, 进排水系统分开, 进水口设有过滤系统, 养殖池15亩左右, 水深2 m左右。鳗苗放养密度视规格而定, 35 尾/kg密度为6000—9000 尾/亩。鳗苗投池后30天按规格分池, 20 尾/kg的鳗苗密度为3000—5000 尾/亩, 22 尾/kg密度为4000—6000 尾/亩。同时水车式和叶轮式增氧机交替开设,

保持池塘水体溶氧始终在5 mg/L以上。在投喂时, 先将粉状商品饲料用水搅拌成团块状置于料台内, 坚持定质、定量、定时及定位的“四定”原则。鳗鲡大小为35—15 尾/kg时, 投饵率为6%, 进入15 尾/kg以内的成鳗期后投饵率为3%, 每天8:00和17:00各投喂1次, 定时巡塘, 观察鳗鲡摄食和生长情况。养殖期间及时记录每天温度、pH及溶氧, 定期换水, 换水或投饵期间用红糖活化芽孢杆菌并结合光合细菌全池泼洒, 以分解底物有害物质, 起到改底作用。

1.2 水样的采集与分析

分夏秋两季进行水样的采集, 采集方法为从每个鱼塘四角及中间位置中层采集5份等量的水, 倒入大桶混匀, 待用于水体中化学需氧量(COD)、叶绿素 a 及总氮总磷等指标进行检测。采样的同时使用水质分析仪(丁海便捷式溶氧pH计, 广州丁海科技有限公司), 现场测定6个池塘的温度、pH、溶解氧和透明度, 每个塘取1份300 mL混匀水样立即加入4.5 mL的鲁哥试剂固定。每个塘取1份混匀水样当天测定, 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)、总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB11893-89); 同时取50 mL混匀水样送检广州丁海科技有限公司用于测定氨氮、亚硝酸盐、总硬度; 每个塘取1份1.5 L混匀水样经0.22 μm 滤膜过滤后, 送检美吉生物公司利用16S rDNA高通量测序, 测定水质细菌微生物的多样性和物种组成。另每个塘取1份200 mL混匀水样用0.45 μm 乙酸纤维滤膜过滤, 使用丙酮浸泡滤膜, 4℃保存14—24h后采用分光光度计测定不同波长

表1 夏秋两季养殖塘放养密度相关数据

Tab. 1 Data related to stocking density of fish ponds in summer and autumn

鱼塘编号 Number of fish pond	鱼塘面积 Area of fish ponds (m^2)	总尾数 Total quantity	总重量 Gross weight (kg)	尾均重 Average fish weight (g)	放养密度 Stocking density (kg/m^2)
1	10000	38000	15116.40	397.80	1.51
2	10000	36000	14994.00	416.50	1.50
3	10000	37000	14888.80	402.40	1.49
4	10000	59000	21727.34	368.26	2.17
5	10000	57000	21364.17	374.81	2.14
6	10000	58000	21334.14	367.83	2.13
I	10000	36000	17413.20	483.70	1.74
II	10000	38000	17168.40	451.80	1.72
III	10000	37000	17523.20	473.60	1.75
IV	10000	60000	23550.00	392.50	2.36
V	10000	59000	23397.63	396.57	2.34
VI	10000	58000	23586.86	406.67	2.36

下叶绿素溶液的吸光度, 根据Arnon公式推导计算叶绿素 a 含量。14—24h后每个塘取1份混匀250 mL水样用高锰酸钾法测定化学需氧量(COD)。固定的水样室温静置48h后进行浓缩, 置于红细胞计数板上, 通过显微镜观察藻类并计数, 比较不同养殖密度条件下浮游藻类密度差异。

1.3 生长相关指标计算公式

采样时对鳗鲡进行称重, 并使用以下公式计算鳗鲡的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、肝体比(HSI)和脏体比(VSI):

增重率 (Weight gain rate, WGR, %)=($W_f - W_i$)/ $W_i \times 100$

特定生长率 (Specific growth rate, SGR, %/d)=($\ln W_f - \ln W_i$)/ $t \times 100$

肝体比 (Hepatosomatic index, HSI)= $W_l/W_b \times 100$

脏体比 (Viscerosomatic index, VSI)= $W_v/W_b \times 100$
式中, W_i 和 W_f 分别为初始和终末的平均鱼体质量(g), t 为终末养殖天数(d), W_b 代表鱼体质量(g), W_l 和 W_v 分别代表肝脏和内脏重量(g)。

1.4 质构分析

用手术刀取鳗鲡背部左侧侧线上方肌肉组织, 将皮剪掉, 尽可能减少对肌纤维的破坏, 样品修整为1.5 cm×1.5 cm×1 cm的块状。立即使用Universal TA质构仪(上海腾拔仪器科技有限公司)进行全质构分析(TPA), 采用型号为P35的圆柱形探头进行检测, 测试前速度为2 mm/s, 测试后速度为5 mm/s, 测试速度为1 mm/s, 测试间隔时间为5s, 压缩比为30%, 每尾鱼取3—5个肉块进行测定。测定参数包括硬度、黏性、弹性、咀嚼性、胶着性、黏聚性、回复性和剪切力。

1.5 营养成分分析

取鳗鲡鳃盖缘至肛门躯段背部中点肌肉测定

其营养成分。其中水分含量, 称取3 g样品依照GB 5009.3-2010采用常压烘箱干燥法测定; 粗灰分含量, 称取2 g样品按照GB 5009.4-2010采用高温灰化法测定; 粗蛋白含量, 称取0.3 g样品按照GB 5009.5-2010采用凯式定氮法测定; 粗脂肪含量, 称取0.3 g样品依照GB5009.6-85采用索氏提取法测定。

1.6 数据分析

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 26.0软件对数据进行独立样本 t 检验, 所有图采用 Graphpad Prisma 8 进行制作。比较高低密度组的差异用 t 检验的分析方法, ($P>0.05$ 差异不显著; $*P<0.05$ 差异显著; $**P<0.01$ 差异极显著)。实验数据以“平均值±标准误(mean±SE)”表示。

2 结果

2.1 夏秋两季不同放养密度对鳗鲡生长的影响

两季结果均表明, 高密度组末重、特定生长率均显著小于低密度组($P<0.05$) (表2)。

2.2 夏秋两季不同放养密度对养殖塘水质参数的影响

两季结果均表明, 在中层水体温度无显著差异情况下($P>0.05$), 高密度组水质的透明度和溶氧均显著小于低密度组($P<0.05$; 表3), 符合生产常识。

如表4所示, 夏季高密度组水质氨氮、亚硝酸盐、总硬度、化学需氧量(COD)、叶绿素 a 含量相比低密度组显著升高($P<0.05$)。秋季高密度池塘水质总氮、总磷、氨氮、亚硝酸盐、总硬度、COD、叶绿素 a 含量显著高于低密度组($P<0.05$), 水质pH没有显著差异($P>0.05$)。

2.3 夏秋两季不同放养密度对养殖塘藻类分布的影响

夏秋两季不同放养密度养殖塘浮游藻类的群落

表2 夏秋两季不同放养密度组鳗鲡的生长参数

Tab. 2 Growth parameters of eels from different stocking density groups in summer and autumn

季节 Season	组别 Group	初重 Initial body weight (g)	末重 Final body weight (g)	增重率 WGR (%)	特定生长率 SGR (%/d)	肝体比 HSI	脏体比 VSI
夏季 Summer	高密度 High density	46.33±0.44	370.30±2.26	705.00±4.91	1.39±0.01	0.80±0.09	2.43±0.13
	低密度 Low density	50.33±0.66	405.57±5.63	711.13±11.25	1.45±0.01	0.88±0.08	2.50±0.08
	P值 P Value	0.007	0.004	0.644	0.003	0.551	0.660
秋季 Autumn	高密度 High density	45.57±0.98	398.58±4.21	785.73±9.36	1.38±0.01	1.50±0.07	3.68±0.31
	低密度 Low density	50.40±1.23	469.70±9.41	839.40±18.83	1.49±0.01	1.71±0.10	4.46±0.19
	P值 P Value	0.037	0.002	0.063	0.002	0.164	0.097

注: $P<0.05$ 表示同一季节各组之间存在显著差异, $P<0.01$ 表示同一季节各组之间存在极显著差异, 下同

Note: $P<0.05$ indicates significant difference in the same season, $P<0.01$ indicates a very significant difference in the same season, the same applies below

组成相似, 分属5个门, 分别为硅藻门、绿藻门、蓝藻门、裸藻门、隐藻门(表 5和表 6)。其中, 两季各密度组池塘中均是绿藻、硅藻和蓝藻占主要优势。夏秋两季高密度组均发现28种浮游藻类, 低密度组发现27种浮游藻类, 硅藻门、绿藻门和蓝藻门密度分别比低密度组高485.53%、185.75%和740.43%。高密度组的优势群种为硅藻门的小环藻、绿藻门的小球藻、蓝藻门的色球藻; 低密度组的优势群种为硅藻门的舟形藻、绿藻门的栅藻和蓝藻门的色球藻。

秋季高密度组硅藻门、绿藻门、蓝藻门密度分别比低密度组高609.40%、40.21%和201.83%。高密度组的优势群种为硅藻门的小环藻、绿藻门的绿球藻和蓝藻门的色球藻; 低密度组的优势群种为硅藻门的舟形藻、绿藻门的小球藻和蓝藻门的平裂藻。

经统计分析, 夏季高密度组的蓝藻门密度显著高于低密度组($P<0.05$; 图 1), 其余无显著差异(图 2)。

2.4 夏秋两季不同放养密度对养殖塘细菌微生物群落多样性的影响

如表 7所示, 夏秋两季高密度组Shannon指数显

著低于低密度组($P<0.05$); Simpson指数显著高于低密度组($P<0.05$)。所有样品的覆盖率均达到99%以上, 表明样本中所有微生物都被检测到, 可以代表样本的真实情况。

2.5 夏秋两季不同放养密度对养殖塘细菌群落组成的影响

在门水平上(图 3和图 4), 夏秋两季各密度组水质微生物的优势菌大致相同, 主要包含放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)和蓝细菌门(Cyanobacteria)。其中夏秋两季高密度组放线菌门均显著低于低密度组; 而夏季高密度组变形菌门极显著高于低密度组; 秋季拟杆菌门显著高于低密度组。

2.6 夏秋两季不同放养密度对鳊鲢背肌质构特性的影响

如表 8所示, 两季均表明随着放养密度的增加, 鳊鲢肌肉的硬度、剪切力、咀嚼性和回复性显著降低($P<0.05$)。而两组鳊鲢肌肉的黏性、弹性、胶着性和黏聚性没有显著差异($P>0.05$)。

2.7 夏秋两季不同放养密度对鳊鲢背肌营养成分的影响

如表 9所示, 两季结果均表明, 高密度塘鳊鲢背肌水分含量显著高于低密度塘($P<0.05$), 粗脂肪和粗蛋白含量显著低于低密度塘($P<0.05$)。而两组鳊鲢背肌的粗灰分含量没有显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 夏秋两季不同放养密度对水质参数的影响

在水产养殖过程中, 水质是反应水体养殖环境好坏的指标。水质指标包括溶解氧、pH、氨氮、亚硝酸盐、总氮、总磷等养殖参数^[15]。王楠楠^[16]和侯志师等^[17]分别对点带石斑幼鱼和虹鳟养殖密

表 3 夏秋两季不同放养密度组水质的物理参数

Tab. 3 Physical parameters of water quality in different stocking density groups in summer and autumn

季节 Season	组别 Group	温度 Temperature (°C)	透明度 Transparency (cm)	溶氧 Dissolved oxygen (mg/L)
夏季 Summer	高密度 High density	32.75±0.21	17.17±1.36	7.37±0.39
	低密度 Low density	32.96±0.12	27.33±0.67	8.99±0.44
	P值 P Value	0.435	0.003	0.046
秋季 Autumn	高密度 High density	22.44±0.09	17.60±0.58	7.90±0.02
	低密度 Low density	22.21±0.06	23.00±1.00	8.42±0.03
	P值 P Value	0.106	0.007	0.001

表 4 夏秋两季不同放养密度组水质的化学参数

Tab. 4 Chemical parameters of water quality in different stocking density groups in summer and autumn

季节 Season	组别 Group	酸碱度 pH	化学需氧量 COD (mg/L)	总氮 Total nitrogen (mg/L)	总磷 Total phosphorus (mg/L)	氨氮 Ammonia nitrogen (mg/L)	亚硝酸盐 Nitrite (mg/L)	总硬度 Total hardness (mmol/L)	叶绿素a Chlorophyll a (µg/L)
夏季 Summer	高密度 High density	8.37±0.35	7.75±0.26	nd	nd	0.13±0	0.17±0.01	168.48±2.12	174.85±18.09
	低密度 Low density	8.57±0.12	5.73±0.33	nd	nd	0.11±0	0.04±0	152.07±4.32	20.67±1.45
	P值 P Value	0.620	0.009	nd	nd	0.013	0.001	0.027	0.013
秋季 Autumn	高密度 High density	7.70±0.06	7.94±0.28	0.86±0.06	0.56±0.01	0.37±0.01	0.20±0.01	255.16±1.33	125.49±9.74
	低密度 Low density	7.80±0.06	6.40±0.47	0.55±0.08	0.45±0.01	0.22±0.02	0.12±0	176.97±6.69	44.60±2.05
	P值 P Value	0.330	0.048	0.037	0.002	0.004	0.005	0.006	0.001

注: nd表示未检测
Note: nd indicates not detected

表 5 夏季不同放养密度养殖塘浮游藻类密度

Tab. 5 Plankton algae density in ponds with different stocking densities in summer

高密度组藻类 High-density group algae		低密度组藻类 Low-density group algae	
种类 Phylum	密度 Density (个/L)	种类 Phylum	密度 Density (个/L)
硅藻门 Bacillariophyta	20302844	硅藻门 Bacillariophyta	3467457
舟形藻属 Navicula	1200913	舟形藻属 Navicula	1121672
小环藻属 Cyclotella	15875774	小环藻属 Cyclotella	733449
菱形藻属 Nitzschia	922183	菱形藻属 Nitzschia	588674
三角藻属 <i>Trieres</i>	1381791	三角藻属 <i>Trieres</i>	614131
桥弯藻属 Cymbella	142330	桥弯藻属 Cymbella	68200
曲壳藻属 Achnanthes	68200	直链藻属 Melosira	341331
星杆藻属 Asterionella	711652		
绿藻门 Chlorophyta	165915774	绿藻门 Chlorophyta	58063327
绿球藻属 Chlorococcum	13892043	绿球藻属 Chlorococcum	4508659
卵囊藻属 Oocystis	8080217	卵囊藻属 Oocystis	2768706
蹄形藻属 Kirchneriella	33367591	蹄形藻属 Kirchneriella	9400450
月牙藻属 Selenastrum	4219504	月牙藻属 Selenastrum	1164084
空球藻属 Eudorina	2452235	空球藻属 Eudorina	814378
小球藻属 Chlorella	58954452	小球藻属 Chlorella	10346289
衣藻属 Chlamydomonas	9260374	衣藻属 Chlamydomonas	12922793
栅藻属 Scenedesmus	15336104	栅藻属 Scenedesmus	13250275
团藻属 <i>Volvox</i>	3146096	团藻属 <i>Volvox</i>	853760
实球藻属 Pandorina	1512261	实球藻属 Pandorina	272800
鼓藻属 Cosmarium	5859270	鼓藻属 Cosmarium	1231953
十字藻属 Crucigenia	3751000	十字藻属 Crucigenia	179474
四孢藻属 Tetraspora	5942296	四孢藻属 Tetraspora	277153
空星藻属 Coelastrum	142330	空星藻属 Coelastrum	72553
蓝藻门 Cyanophyta	14274557	蓝藻门 Cyanophyta	1698483
平裂藻属 Merismopedia	6861513	平裂藻属 Merismopedia	136400
色球藻属 Chroococcus	7128383	色球藻属 Chroococcus	1353130
鱼腥藻属 Anabaena	284661	鱼腥藻属 Anabaena	208953
裸藻门 Euglenophyta	1257252	裸藻门 Euglenophyta	1493552
扁裸藻属 <i>Phacus</i>	278730	扁裸藻属 <i>Phacus</i>	682331
裸藻属 <i>Euglena</i>	978522	裸藻属 <i>Euglena</i>	811221
隐藻门 Cryptophyta	23211722	隐藻门 Cryptophyta	12356292
隐藻属 Cryptomonas	22932991	隐藻属 Cryptomonas	8676776
蓝隐藻属 Chroomonas	278730	蓝隐藻属 Chroomonas	3679516

表 6 秋季不同放养密度养殖塘浮游藻类密度

Tab. 6 Plankton algae density in ponds with different stocking densities in autumn

高密度组藻类 High-density group algae		低密度组藻类 Low-density group algae	
种类 Phylum	密度 Density (个/L)	种类 Phylum	密度 Density (个/L)
硅藻门 Bacillariophyta	26131440	硅藻门 Bacillariophyta	3683618
舟形藻属 Navicula	2238800	舟形藻属 Navicula	1650959
小环藻属 Cyclotella	12206172	小环藻属 Cyclotella	908395
菱形藻属 Nitzschia	1799453	菱形藻属 Nitzschia	281300
三角藻属 <i>Trieres</i>	649314	三角藻属 <i>Trieres</i>	375067
桥弯藻属 Cymbella	5040776	桥弯藻属 Cymbella	180692
曲壳藻属 Achnanthes	1596947	曲壳藻属 Achnanthes	180692
圆筛藻属 Coscinodiscus	2599979	圆筛藻属 Coscinodiscus	106513
绿藻门 Chlorophyta	119065028	绿藻门 Chlorophyta	84921579
绿球藻属 Chlorococcum	52515082	绿球藻属 Chlorococcum	8544369
卵囊藻属 Oocystis	717331	卵囊藻属 Oocystis	6817969
蹄形藻属 Kirchneriella	10435804	蹄形藻属 Kirchneriella	16839111
月牙藻属 Selenastrum	1063301	月牙藻属 Selenastrum	3718630
空球藻属 Eudorina	2057893	空球藻属 Eudorina	495728
小球藻属 Chlorella	37909529	小球藻属 Chlorella	36441619
衣藻属 Chlamydomonas	2494767	衣藻属 Chlamydomonas	5588618
栅藻属 Scenedesmus	5714297	栅藻属 Scenedesmus	2394341
团藻属 <i>Volvox</i>	53257	团藻属 <i>Volvox</i>	588792
实球藻属 Pandorina	1105072	实球藻属 Pandorina	518532
鼓藻属 Cosmarium	1591297	鼓藻属 Cosmarium	747974
十字藻属 Crucigenia	426054	十字藻属 Crucigenia	106122
四孢藻属 Tetraspora	1802887	四孢藻属 Tetraspora	1677106
空星藻属 Coelastrum	1178458	空星藻属 Coelastrum	442667
蓝藻门 Cyanophyta	14926088	蓝藻门 Cyanophyta	4945190
平裂藻属 Merismopedia	5389050	平裂藻属 Merismopedia	3014649
色球藻属 Chroococcus	8927753	色球藻属 Chroococcus	1411293
鱼腥藻属 Anabaena	609284	鱼腥藻属 Anabaena	519248
裸藻门 Euglenophyta	7284712	裸藻门 Euglenophyta	583902
扁裸藻属 <i>Phacus</i>	1273459	扁裸藻属 <i>Phacus</i>	494327
裸藻属 <i>Euglena</i>	5792954		
隐藻门 Cryptophyta	9849539	隐藻门 Cryptophyta	980241
隐藻属 Cryptomonas	3378246	隐藻属 Cryptomonas	2555146
蓝隐藻属 Chroomonas	6471293	蓝隐藻属 Chroomonas	5425095

度下水质变化研究均表明:放养密度越高,溶氧、氨氮、无机氮、COD、活性磷(PO_4^{3-})等各水质指标越差。在本研究中,夏秋两季高低密度池塘的透明度、COD、溶氧、亚硝酸盐、氨氮等指标也呈现类似的结果。养殖水体透明度表示光线透入池塘池水深浅的程度,其大小由水中浮游生物、有机碎屑、泥沙或其他悬浮物的含量所决定^[18]。COD是衡量水体有机污染物的重要指标,值越大,表明水体有机污染越严重。乔玮等^[19]在研究养殖密度对循环水系统中大菱鲆生长的影响中发现随着养殖密度的升高,COD等水质指标显著升高。本研究高密度组总投饵更多,意味着总排泄有机污染物也将更多,可潜在导致COD水平更高。溶氧是水产养殖中不可或缺的因素之一,在高密度养殖情况下,鱼群竞争活动加剧,耗氧量增加,水体溶解氧降低^[20]。亚硝酸盐是氮循环的中间产物,含量升高时,极易对鱼产生毒性^[21]。而溶氧降低,可促使反硝化菌作

用,导致亚硝酸盐升高^[22]。本研究发现,高密度养殖水体中亚盐含量显著升高,这与祁真等^[23]在高放养密度下对虾养殖水体亚盐升高结果相一致。同时随着高密度组溶氧降低,氨氮含量随之升高,分

表 7 夏秋两季不同放养密度养殖塘水质细菌的多样性指数
Tab. 7 Diversity index of water quality bacteria in aquaculture ponds with different stocking densities in summer and autumn

季节 Season	组别 Group	香农指数 Shannon	辛普森指数 Simpson	覆盖率 Good coverage (%)
夏季 Summer	高密度 High density	2.18±0.14	0.26±0.03	0.99±0
	低密度 Low density	3.33±0.26	0.12±0.03	0.99±0
	P值 P Value	0.018	0.019	0.716
秋季 Autumn	高密度 High density	3.16±0.08	0.16±0.01	0.99±0
	低密度 Low density	3.52±0.05	0.11±0.01	0.99±0
	P值 P Value	0.017	0.049	0.084

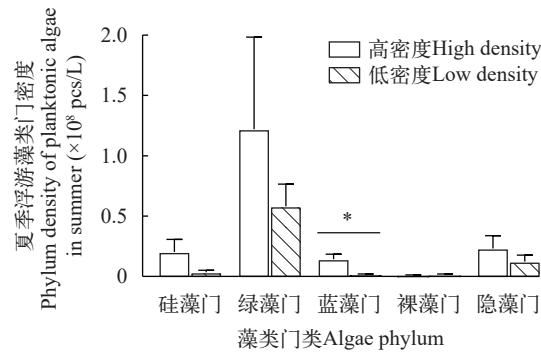


图 1 放养密度对夏季藻类门密度的影响

Fig. 1 Effect of stocking density on algal density (phylum) in summer

*表示同一季节各组之间存在显著性差异($P<0.05$);下同
* indicates significant difference in groups in the same season ($P<0.05$); the same applies below

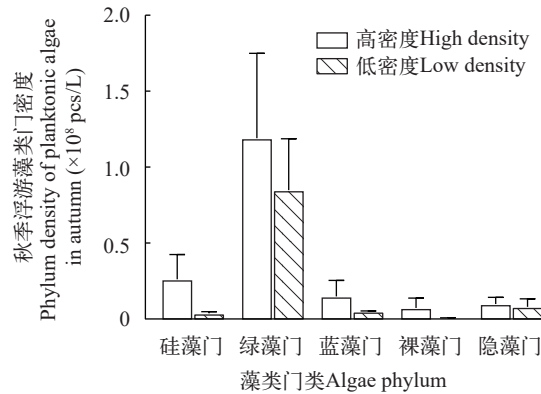


图 2 放养密度对秋季藻类门密度的影响

Fig. 2 Effect of stocking density on algal density(phylum) in autumn

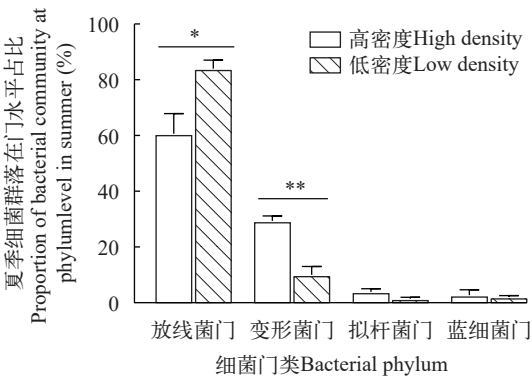


图 3 夏季放养密度对细菌群落的影响

Fig. 3 Effect of stocking density on bacterial communities in summer

**表示同一季节各组之间存在极显著性差异($P<0.01$)
** indicates a very significant difference in groups in the same season ($P<0.01$)

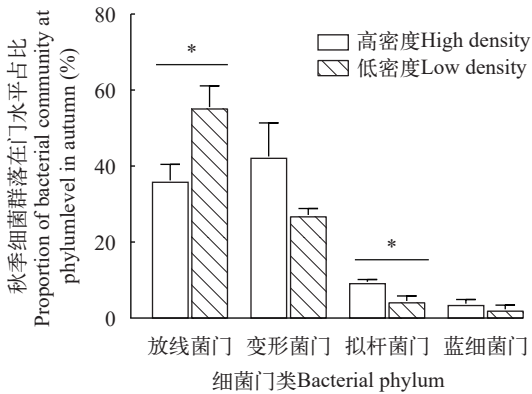


图 4 秋季放养密度对细菌群落的影响

Fig. 4 Effect of stocking density on bacterial communities in autumn

表 8 夏秋两季不同放养密度养殖塘鳗鲡背肌的质构特性

Tab. 8 Textural characteristics of the eel dorsal muscle in different stocking density groups in summer and autumn

季节 Season	组别 Group	硬度 Hardness	黏性 Stickiness	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness	胶着性 Gumminess	黏聚性 Cohesiveness	回复性 Resilience	剪切力 Shearing force
夏季 Summer	高密度 High density	450.79±15.30	0.49±0.04	0.59±0.02	149.54±6.91	318.56±17.95	0.61±0.02	0.90±0.03	16335.53±208.66
	低密度 Low density	517.13±9.19	0.51±0.06	0.57±0.02	228.50±7.18	288.56±10.56	0.59±0.01	1.13±0.02	17483.17±310.49
	P值 P Value	0.001	0.739	0.527	<0.001	0.133	0.381	<0.001	0.041
秋季 Autumn	高密度 High density	414.27±17.47	0.26±0.12	0.65±0.01	153.69±7.31	273.74±13.01	0.63±0.01	0.96±0.03	14717.50±477.72
	低密度 Low density	479.95±16.92	0.33±0.12	0.65±0.02	228.08±12.71	274.83±14.13	0.62±0.01	1.18±0.04	16884.18±642.19
	P值 P Value	0.014	0.676	0.877	<0.001	0.955	0.745	0.001	0.017

表 9 夏秋两季不同放养密度养殖塘鳗鲡背肌的营养成分(湿重%)

Tab. 9 Nutrient composition of eel dorsal muscle in different stocking density groups in summer and autumn (% wet weight)

季节 Season	组别 Group	水分 Moisture	粗脂肪 Crude lipid	粗蛋白 Crude protein	粗灰分 Ash
夏季 Summer	高密度 High density	58.63±0.01	22.89±0.45	16.58±0.39	1.16±0.07
	低密度 Low density	56.10±0.01	24.97±0.59	18.71±0.29	1.03±0.01
	P值	0.04	0.031	0.003	0.208
秋季 Autumn	高密度 High density	60.03±0.01	23.35±0.23	16.33±0.35	1.25±0.07
	低密度 Low density	57.75±0	24.92±0.28	17.53±0.05	1.14±0.04
	P值	0.033	0.005	0.024	0.194

析原因可能是溶氧下降,池塘中硝化细菌作用减弱,而有机物含量升高,造成氨氮积累加剧^[24]。值得一提的是秋季高密度组氨氮含量为0.37 mg/L,远高于渔业水质标准0.20 mg/L^[25],提示秋季高密度池塘鱼存在较大氨氮应激风险。

总氮、总磷与藻类一起常作为判断水体是否富营养化的重要指标,亦可以反映水体的污染程度^[26]。有研究报道,高密度组缙蛭养殖水体的TN、TP显著高于中、低密度组,水体呈现一定的富营养化,高TN和TP是由于高密度缙蛭总饵料与代谢有机物潜在更多所致^[27]。本研究也发现相似规律,高密度组TP和TN含量显著升高,且与上述COD和氨氮指标升高相一致,提示水体存在富营养化风险。

3.2 夏秋两季不同放养密度对水体营养状况及藻类分布的影响

浮游藻类密度、种类组成和多样性能较好地反映水体的营养水平^[28]。叶绿素 Chl.a 含量是反映水体中浮游植物生物量的综合指标,与总氮、总磷一起衡量水体的营养状态^[25, 26]。当总氮总磷超过0.5 mg/L时,叶绿素a含量在64—160 μg/L,水体有轻度或中度富营养化风险;大于160 μg/L则有重度富营养化风险。研究发现,凡纳滨对虾在238和473 ind./

m³两种密度下的水质指标,高密度组(473 ind./m³)水体叶绿素a明显升高,随之水体富营养化加剧^[29]。本研究高密度组总氮含量为0.86 mg/L;总磷含量为0.56 mg/L;两季叶绿素a含量均大于100 μg/L,印证了高密度水体确实存在富营养化现象。

在光照和营养盐适宜的条件下,藻类通过光合作用改善水质。当营养过剩时则会因影响藻类组成与分布,对水质产生负面影响。不过,不同藻类对水生态系统的影响存在差别。绿藻和硅藻门中不少能作为饵料生物,一般为有益藻^[30],蓝藻在特定条件下,能在较短时间内形成“水华”;裸藻是在养殖中后期出现倒藻的重要因素^[31]。有报道在藻类中,蓝藻平均密度随放养密度的增加而增加,据推测这是由于蓝藻体内有两套CO₂转化系统,能有效降低蓝藻的光呼吸,使其在更差的水质条件中有更好的适应性^[32]。而水质恶化时暴发的蓝藻会产生大量蓝藻毒素,限制其他藻类生长,使水体藻相结构失衡,之后氨氮等很难被藻类吸收,亚硝酸盐的产生与吸收平衡被打破,引起水体中溶氧波动,导致水体中氨氮、亚盐含量升高,溶氧降低^[33, 34]。在本研究中高密度组蓝藻升高,氨氮、亚盐升高,溶氧降低等与前述文献相一致,初步得出结论,放养密度越高,水质恶化的风险也越大。不过上述提到蓝藻、裸藻一般为有害藻;绿藻、硅藻为有益藻,但本研究高密度水体中绿藻、硅藻密度也相对较高,可见仅从藻类数量上不能准确反映水质状况,需深入探讨菌群多样性及物种组成才能进一步准确评估水质生态状况。

3.3 夏秋两季不同放养密度对养殖塘细菌群落多样性和菌群丰度的影响

在水生生态系统中,细菌是有机物分解矿化、C、N、P等营养元素转化及污染物降解的主要参与者,在物质循环和能量流动中起着重要作用。除了水体环境因子,微生物菌群对环境变化十分灵敏,其多样性和构成在一定程度上真实反映水体的状

况。同时,水体水质质量与群落多样性呈正相关。群落多样性通过Shannon和Simpson指数反映,Shannon值越大,群落多样性越高,均一性较好,Simpson指数则相反^[35]。在本研究中,夏秋两季高密度组Shannon指数显著降低,提示其群落多样性可能较低,与上述报道相一致。另有研究报道,蓝藻增多会对水产养殖产生危害,降低养殖水体的微生物多样性^[36],本试验高密度组蓝藻数量增多与之相吻合。

放线菌是好氧菌,是广泛分布于自然界中的有分枝倾向或可能形成分枝菌丝和分生孢子的特殊微生物类群^[37]。其不仅具有抑制腐败菌生长繁殖的功能,同时还能转化氮、磷等元素,丰度越大,转化功能和改善水质作用越强^[38]。与之一致,本研究高密度组放线菌门的丰度相对较低,水质氮、磷等含量升高,水质更差。此外,有研究发现灰鲢放养密度升高,变形菌门丰度相应增加^[39]。变形菌和拟杆菌是淡水栖息地,河流、湖泊和养殖塘沉积物(主要为有机物)中主要的细菌群落^[40,41]。变形菌门被认为与水质富营养化指标呈正相关关系^[42],拟杆菌群在高密度养殖,水体代谢废物和残余饵料等大量有机物富集情况下亦相应增加^[43]。这与变形菌、拟杆菌促进硫、氮和有机化合物的循环作用有关^[44]。本研究与前述结果相一致,两季高放养密度变形菌门和拟杆菌门的相对丰度更高,这与其有机物含量潜在更高也相一致。

3.4 夏秋两季不同放养密度对鳊鲢背肌质构与营养成分的影响

质构分析是评价食用动物肌肉品质的一项重要指标,质构剖面分析(Texture profile analysis, TPA)是最常用评价水产品肌肉质构特性的方法,其通过模拟人的触觉,结合力学特性,分析检测触觉中的物理特征,包括参数有脆性、硬度、弹性、黏聚性(内聚性或凝聚性)、咀嚼性、胶着性(胶黏性)、黏性和回复性(恢复性)等^[45]。其中,硬度被认为是影响鱼肉质构特性的主要因素^[46]。研究报道,肌肉硬度越大,抵抗牙齿咬力的能力越大,弹性也越大,通常在消费者接受度上鱼肉的硬度大是品质优良的重要体现^[47]。Wu等^[48]对草鱼进行了研究,认为肌肉硬度与水分含量成反比关系。类似的,林婉玲等^[49]在研究影响脆肉鲩背肌质构特性的因素时也发现,鱼肉硬度与其水分含量呈负相关。与前述文献结果一致,在本研究中高密度组鳊鲢肌肉水分含量显著升高,同时也伴随肌肉硬度显著降低,且提示鱼品质下降。除TPA外,剪切力也是质构应用中常会应用到的参数和评价指标,正常肉剪切力值越低,表示肉质更嫩或肉质松散^[50]。本研究高密度组鳊

鲢肌肉的剪切力显著降低,而水分升高,可能与肉质更为松散有关。咀嚼性是指咀嚼食物可吞咽状态所需的能量。周伟等^[51]研究了养殖密度对斑节对虾肌肉品质的影响,发现随着养殖密度的增加,硬度和咀嚼度均显著下降,肌肉品质变差。这与本研究高密度组鳊鲢肌肉的硬度、咀嚼度显著降低结果一致,进一步说明了放养密度较高会对鳊鲢肌肉品质产生不利影响。

对鱼类肌肉水分、粗蛋白和粗脂肪进行分析,是肉质营养成分和品质评价过程中重要的一部分^[52]。薛宝贵等^[53]对黄姑鱼进行了研究,认为在高密度胁迫下,当鱼体血液中血糖含量较低时,机体会消耗蛋白质和脂肪,通过糖异生作用增加血液中血糖含量,为机体提供能量,从而影响鱼体的生长和营养物质的积累。任源远等^[54]对养殖密度为5.5、8.0和11.0 kg/m³的施氏鲟幼鱼研究也发现,其肌肉中的粗蛋白和粗脂肪随养殖密度的增大而显著降低;文章还指出,在高密度养殖条件下,施氏鲟为了适应胁迫而保持高耗能,鱼体肌肉的有机质被大量消耗,从而导致水分含量相对增加。本研究在高密度放养条件下,虽然未进行糖代谢相关指标的测定,但鱼蛋白质和脂肪含量下降,水分含量升高,这与前述研究趋势相一致。鱼类肌肉中的水分与营养和口感有关,通常水分含量升高则总营养水平降低,口感相应较差^[55]。本研究中高密度塘鱼规格略小于低密度塘,因此也不能排除大小对营养组分的影响。不过本课题组前期的研究表明小规格日本鳊鲢水分含量并不低于大规格,且硬度、剪切力高于大规格(未发表)。因此,本研究相对规格更小的高密度鳊鲢肌肉的水分升高、硬度与剪切力下降可归结为密度因素影响,进一步证明高密度养殖通过影响质构与营养组分改变鳊鲢的营养品质与口感。

综上所述,高密度养殖对水质指标、藻类组成、菌群多样性及鱼体质构、营养成分等均产生了显著的负面影响,不仅显著降低了鳊鲢粗脂肪、粗蛋白含量,而且对质构水平产生不利影响,提示密度因素可能通过脂肪介导对质构品质和营养组分产生影响,进而影响鳊鲢的营养品质与口感,当然,在本研究中也并不能排除鳊鲢大小对营养组分的影响。因此,在保障鳊鲢正常生长的前提下,建议养殖密度不宜超过2.17 kg/m²。

参考文献:

- [1] Salas-Leiton E, Anguis V, Martin-Antonio B, et al. Effects of stocking density and feed ration on growth and gene expression in the Senegalese sole (*Solea senegalensis*)

- sis): potential effects on the immune response [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2010, **28**(2): 296-302.
- [2] YAN Sun An, Yao Q H, Lin X X, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional component of *Pelteobagrus vachelli* cultured with different stocking density [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, **10**(19): 6637-6644. [颜孙安, 姚清华, 林香信, 等. 不同养殖密度瓦氏黄颡鱼肌肉营养成分分析与评价 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, **10**(19): 6637-6644.]
- [3] Lu J, Li S, He X, *et al.* An in-pond tank culture system for high-intensive fish production: effect of stocking density on growth of grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Valenciennes, 1844) and blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala* Yih, 1955) [J]. *Aquaculture*, 2022(549): 737808.
- [4] Zhou W, Wang Y, Sun X L, *et al.* Effect of stocking density on muscle quality of *Penaeus monodon* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, **39**(23): 69-75. [周伟, 王洋, 孙学亮, 等. 养殖密度对斑节对虾肌肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, **39**(23): 69-75.]
- [5] Rabalais N N, Díaz R J, Levin L A, *et al.* Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(2): 585-619.
- [6] Zhu Y C, Tan H X, Luo G Z. Effect of different stocking density on growth performance of *Litopenaeus vannamei* and water quality in nitrifying bio-floc system [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, **29**(1): 27-35. [朱亦晨, 谭洪新, 罗国芝. 养殖密度对硝化型生物絮团系统中凡纳滨对虾生长和水质的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2020, **29**(1): 27-35.]
- [7] Hou W J, Zang W L, Liu Y S, *et al.* Effects of stocking densities on growth and water quality in *Litopenaeus vannamei* indoor culture [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2010, **37**(2): 284-289. [侯文杰, 臧维玲, 刘永士, 等. 室内凡纳滨对虾养殖密度对水质与生长的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2010, **37**(2): 284-289.]
- [8] Zhang X, Zheng W, Zhang H, *et al.* Comparison of muscle quality of the yellow catfish cultured in In-pond raceway systems and traditional ponds [J]. *Water*, 2022, **14**(8): 1223.
- [9] Zhu Y L. Dynamic changes of nutrients in beach water and their effects on phytoplankton and fish growth [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004: 1-2. [祝云龙. 滩塘水体营养盐的动态变化及其对浮游植物和鱼生长的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2004: 1-2.]
- [10] Li T Z, Li K, Wu J M, *et al.* Comparative study on the nutrient composition, amino acids, and fatty acids composition of glass eel tissues of Japanese eel (*Anguilla japonica*) from offshore of China [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(6): 105-117. [李铁柱, 李慷, 吴嘉敏, 等. 中国近海日本鳗鲡玻璃鳗体组织营养成分及氨基酸、脂肪酸组成的比较 [J]. 水产学报, 2023, **47**(6): 105-117.]
- [11] Luo M Z, Guan R Z, Jin H. Analysis on the ratio of flesh content and the nutritional composition in the muscle of five species of eel [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(4): 714-722. [罗鸣钟, 关瑞章, 靳恒. 五种鳗鲡的含肉率及肌肉营养成分分析 [J]. 水生生物学报, 2015, **39**(4): 714-722.]
- [12] Tan C, Sun D, Tan H, *et al.* Effects of stocking density on growth, body composition, digestive enzyme levels, and blood biochemical parameters of *Anguilla marmorata* in a recirculating aquaculture system [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018(18): 9-16.
- [13] Schafberg M, Loest K, Müller-Belecke A, *et al.* Pikeperch (*Sander lucioperca*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with an alternative microorganism mix for reducing fish meal and oil-fishes' growth performances and quality traits [J]. *Foods*, 2021, **10**(8): 1799.
- [14] Hu L, Yun B, Xue M, *et al.* Effects of fish meal quality and fish meal substitution by animal protein blend on growth performance, flesh quality and liver histology of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Aquaculture*, 2013(372/373/374/375): 52-61.
- [15] Wang C, Li Z, Pan Z, *et al.* A high-performance optoelectronic sensor device for nitrate nitrogen in recirculating aquaculture systems [J]. *Sensors*, 2018, **18**(10): 3382.
- [16] Wang N N. Effects of stocking density on growth and survival of Malabar grouper *Epinephelus malabaricus* and water quality in an indoor recirculating aquaculture system [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2015, **28**(3): 44-47. [王楠楠. 循环水养殖中放养密度对点带石斑鱼幼鱼生长、存活和水质的影响 [J]. 水产学杂志, 2015, **28**(3): 44-47.]
- [17] Hou Z S, Wen H S, Li J F, *et al.* Effects of Cage Culture Density on Rainbow Trout Growth, Body Composition, Cortisol and Water Quality [C]. Abstract Collection of Papers of the Annual Meeting of the Chinese Fisheries Society, Hangzhou, 2015: 234. [侯志帅, 温海深, 李吉方, 等. 网箱养殖密度对虹鳟生长、体组分、皮质醇与水质的影响 [C]. 2015年中国水产学会学术年会论文摘要集. 杭州, 2015: 234.]
- [18] Liu G L. The effect of two species bivalve filter feeding on water transparency [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014: 5-6. [刘桂兰. 两种贝类滤食对封闭水体透明度影响的研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014: 5-6.]
- [19] Qiao W, Song X F, Gao C R, *et al.* Effects of stocking density on the growth and physiology of adult turbot and changes in water quality [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, **35**(5): 76-82. [乔玮, 宋协法, 高淳仁, 等. 养殖密度对循环水系统中大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 生长的影响 [J]. 渔业科学进展, 2014, **35**(5): 76-82.]
- [20] Arnold S J, Coman F E, Jackson C J, *et al.* High-intensity, zero water-exchange production of juvenile tiger shrimp,

- Penaeus monodon*: an evaluation of artificial substrates and stocking density [J]. *Aquaculture*, 2009, **293**(1/2): 42-48.
- [21] Xu Y. Physiological response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to ammonia and nitrite nitrogen stress [D]. Nanjing Agricultural University, 2017: 4-12. [徐杨. 尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)对氨氮和亚硝酸盐氮胁迫的生理响应 [D]. 南京农业大学, 2017: 4-12.]
- [22] Zhang S. Effects of aquaculture density and models on growth environment and growth performance of *Sebastes schlegelii* [D]. Dalian Ocean University, 2023: 13-14. [张赛. 密度和模式对许氏平鲷生长环境和性能的影响 [D]. 大连海洋大学, 2023: 13-14.]
- [23] Qi Z, Yang J P, Liu Y. Effects of feed remnants, excrement and dead shrimp bodies on water quality in aquaria [J]. *Fisheries Science*, 2004, **23**(11): 5-8. [祁真, 杨京平, 刘鹰. 对虾池残饵、粪便及死虾腐解对养殖水质影响的模拟试验 [J]. *水产科学*, 2004, **23**(11): 5-8.]
- [24] Chary K, Brigolin D, Callier M D. Farm-scale models in fish aquaculture—An overview of methods and applications [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, **14**(4): 2122-2157.
- [25] Ren Z W. Study on online detection method and system of ammonia nitrogen in aquaculture [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 1-2. [任作为. 水产养殖氨氮在线检测方法及系统研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 1-2.]
- [26] Cai L Y, Li Y, Zheng Z H. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication [J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(2): 235-241. [蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. *地球与环境*, 2010, **38**(2): 235-241.]
- [27] Li H Y. Effects of culture mode and density on growth and physiological indexes of *Sinonovacula constricta* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021: 27-28. [李浩宇. 养殖模式和密度对缢蛏生长与生理指标的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021: 27-28.]
- [28] Liu Y, Shen J Z. Application of biological evaluation of algae in water quality monitoring [J]. *Reservoir Fisheries*, 2008, **29**(4): 5-7. [刘宇, 沈建忠. 藻类生物学评价在水质监测中的应用 [J]. *水利渔业*, 2008, **29**(4): 5-7.]
- [29] Schweitzer R, Arantes R, Baloi M F, et al. Use of artificial substrates in the culture of *Litopenaeus vannamei* (Biofloc System) at different stocking densities: effects on microbial activity, water quality and production rates [J]. *Aquacultural Engineering*, 2013(54): 93-103.
- [30] Gao Y H, Liang J R, Chen C P, et al. Studies on biodiversity and ecological importance of marine diatoms [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2011, **50**(2): 455-464. [高亚辉, 梁君荣, 陈长平, 等. 海洋硅藻多样性与生态作用研究 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2011, **50**(2): 455-464.]
- [31] Liu G X. Characteristics, harm and regulation of *Euglena* bloom in aquaculture ponds [J]. *China Fisheries*, 2009(2): 59-60. [刘国祥. 水产养殖池塘裸藻水华的特点、危害和调控 [J]. *中国水产*, 2009(2): 59-60.]
- [32] Price D J, Bate M R. The effect of magnetic fields on the formation of circumstellar discs around young stars [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2007, **311**(1): 75-80.
- [33] Hu M H, Wu Z, Zhou Z Q, et al. The impact of polyculture of freshwater mussel on water quality, plankton community and mussel growth performance in ponds of silver carp and bighead carp [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(2): 200-207. [胡梦红, 武震, 周作强, 等. 鱼蚌混养对池塘水质、藻相结构及三角帆蚌生长的影响 [J]. *水产学报*, 2014, **38**(2): 200-207.]
- [34] Chen X, Liang X F, Li J, et al. Study of water quality and sediment purification by nitrifying bacteria in a California perch (*Micropterus salmoides*) pond [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(2): 399-406. [陈旭, 梁旭方, 李姣, 等. 硝化细菌对加州鲈池塘水质影响及底质净化作用 [J]. *水生生物学报*, 2020, **44**(2): 399-406.]
- [35] Nie Z J, Xu G C, Du F K, et al. PCR-DGGE fingerprinting and diversity analysis of the predominant bacterial community in *Coilia nasus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(5): 1019-1026. [聂志娟, 徐钢春, 杜富宽, 等. 长江刀鲚体内菌群PCR-DGGE指纹图谱及多样性比较分析 [J]. *水生生物学报*, 2015, **39**(5): 1019-1026.]
- [36] Sun Z W, Qiu L H, Cao Y C, et al. Research progress on the effect of cyanobacteria bloom on aquaculture [J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(1): 231-235. [孙志伟, 邱丽华, 曹煜成, 等. 蓝藻水华对水产养殖业影响的研究进展 [J]. *生态科学*, 2017, **36**(1): 231-235.]
- [37] Zhang C Q, Dai J R. Status of and prospects for research on actinomycetes [J]. *Journal of Pathogen Biology*, 2019, **14**(1): 110-113. [张超群, 戴建荣. 放线菌的研究现状与展望 [J]. *中国病原生物学杂志*, 2019, **14**(1): 110-113.]
- [38] Lin Q, Zhu Z H. One of the topics of beneficial microorganisms: application of beneficial microbial flora in aquaculture [J]. *China Fisheries*, 2008(10): 48-49. [林钦, 朱志红. 有益微生物专题之一: 有益微生物菌群在水产养殖中的应用研究 [J]. *中国水产*, 2008(10): 48-49.]
- [39] Hoang M N, Nguyen P N, Le D V B, et al. Effects of stocking density of gray mullet *Mugil cephalus* on water quality, growth performance, nutrient conversion rate, and microbial community structure in the white shrimp *Litopenaeus vannamei* integrated system [J]. *Aquaculture*, 2018, **496**: 123-133.
- [40] Liu G H, Rajendran N, Amemiya T, et al. Bacterial community structure analysis of sediment in the Sagami River, Japan using a rapid approach based on two-dimensional DNA gel electrophoresis mapping with selective primer pairs [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **182**(1): 187-195.
- [41] Martins G, Henriques I, Ribeiro D C, et al. Bacterial

- diversity and geochemical profiles in sediments from eutrophic azorean lakes [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, **29**(8): 704-715.
- [42] Sakami T, Fujioka Y, Shimoda T. Comparison of microbial community structures in intensive and extensive shrimp culture ponds and a mangrove area in Thailand [J]. *Fisheries Science*, 2008, **74**(4): 889-898.
- [43] Zhao X W, Ding J, Dou Y, *et al.* Bacterial diversity in the breeding environment of *Takifugu rubripes* revealed by MiSeq sequencing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(10): 2965-2970. [赵晓伟, 丁君, 窦妍, 等. 基于MiSeq测序技术分析红鳍东方鲀养殖环境菌群多样性 [J]. 生态学杂志, 2015, **34**(10): 2965-2970.]
- [44] Fukui Y, Abe M, Kobayashi M, *et al.* *Polaribacter porphyrae* sp. nov., isolated from the red alga *Porphyra yezoensis*, and emended descriptions of the genus *Polaribacter* and two *Polaribacter* species [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2013, **63**(Pt_5): 1665-1672.
- [45] Chen M W, Tan M, Liu H P. Texture analyses of two schizothoracinae fishes in Tibet Autonomous Region, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(6): 1224-1231. [陈美群, 谭猛, 刘海平. 西藏两种裂腹鱼鱼肉肉质构特征比较分析 [J]. 水生生物学报, 2018, **42**(6): 1224-1231.]
- [46] Li W Q, Li X Q, Leng X J, *et al.* Preliminary study on flesh quality evaluation of *Siniperca chuatsi* (Basilewsky) [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, **31**(9): 114-117. [李文倩, 李小勤, 冷向军, 等. 鳊鱼肌肉品质评价的初步研究 [J]. 食品工业科技, 2010, **31**(9): 114-117.]
- [47] Johnston I A, Li X, Vieira V L A, *et al.* Muscle and flesh quality traits in wild and farmed Atlantic salmon [J]. *Aquaculture*, 2006, **256**(1/2/3/4): 323-336.
- [48] Wu T, Mao L. Influences of hot air drying and microwave drying on nutritional and odorous properties of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets [J]. *Food Chemistry*, 2008, **110**(3): 647-653.
- [49] Lin W L, Guan R, Zeng Q X, *et al.* Factors affecting textural characteristics of dorsal muscle of crisp grass carp [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **37**(4): 134-137. [林婉玲, 关熔, 曾庆孝, 等. 影响脆肉鲩鱼背肌质构特性的因素 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 134-137.]
- [50] Wang Y. Study on the effect of steaming on muscle quality of turbot [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015: 7-10. [王焱. 蒸制对大菱鲆肌肉品质影响的研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2015: 7-10.]
- [51] Zhou W. Effects of culture salinity and density on meat quality and flavor of *Penaeus monodon* [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2019: 14-15. [周伟. 养殖盐度和密度对斑节对虾肉质及风味的影响 [D]. 天津: 天津农学院, 2019: 14-15.]
- [52] Ma X Z, Wen X, Wang W. Comparisom of muscle nutritional components and nutritive quality of between wild and farmed *Pelteobagrus vachelli* [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, **43**(1): 26-31. [马旭洲, 温旭, 王武. 野生与人工养殖瓦氏黄颡鱼肌肉营养成分及品质评价 [J]. 安徽农业大学学报, 2016, **43**(1): 26-31.]
- [53] Xue B G, Lou B, Xu D D, *et al.* Impact of density stress on growth, metabolism and non-specific immune functions of juvenile *Nibea albiflora* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, **34**(2): 45-51. [薛宝贵, 楼宝, 徐冬冬, 等. 密度胁迫对黄姑鱼幼鱼生长、代谢及非特异性免疫的影响 [J]. 渔业科学进展, 2013, **34**(2): 45-51.]
- [54] Ren Y Y, Wen H S, Li J F, *et al.* Effects and physiological mechanism of stocking density on growth and feeding in juvenile Amur sturgeon *Acipenser schrenckii* in a pond [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, **29**(1): 45-50. [任源远, 温海深, 李吉方, 等. 池塘放养密度对施氏鲟幼鱼生长、摄食和肌肉组分的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2014, **29**(1): 45-50.]
- [55] Qiu X C, Zhao H X, Wang Y J, *et al.* Nutrient analysis and nutritive value evaluation in muscle of catfish *Silurus lanzhouensis* [J]. *Fisheries Science*, 2008, **27**(8): 407-410. [邱小琼, 赵红雪, 王远吉, 等. 兰州鲇肌肉营养成分分析及营养价值评价 [J]. 水产科学, 2008, **27**(8): 407-410.]

STOCKING DENSITY ON WATER QUALITY AND NUTRITIONAL QUALITY OF *ANGUILLA JAPONICA* IN SUMMER AND AUTUMN

YANG Jia-Wen¹, GAO Min¹, CHEN Sen¹, ZHANG Hao-Tian¹, WU Kun¹, WEN Xiao-Bo¹,
HU Xiong², SUN Yu-Ping³ and NING Li-Jun¹

(1. College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Foshan Shunde District Wanghai Feed Industry Co., Ltd., Foshan 528300, China; 3. Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This research aimed to investigate the influence of stocking density on the nutrient and water quality parameters of cultured *Anguilla japonica* in summer and autumn. The stocking densities of the low-density group in summer were 1.51 (pond 1), 1.50 (pond 2) and 1.49 kg/m² (pond 3), while those of the high-density group were 2.17 (pond 4), 2.14 (pond 5) and 2.13 kg/m² (pond 6), respectively. The stocking densities were 1.74 (pond I), 1.72 (pond II) and 1.75 kg/m² (pond III) for the low-density group and 2.36 (pond IV), 2.34 (pond V) and 2.36 kg/m² (pond VI) for the high-density group in autumn. Each time, five water samples and four eels were collected from each pond and each density groups, respectively. The results showed that high-density ponds exhibited lower water transparency and dissolved oxygen levels compared to that of low-density ponds ($P<0.05$). Moreover, high-density ponds had higher levels of nitrogen, phosphorus, ammonia, nitrite, chemical oxygen demand, and Chlorophyll *a* than that of their low-density counterparts ($P<0.05$). Bacillariophyte, Chlorophyll, and Cyanophyte were found to be ten times more abundant in high-density ponds. The Shannon index of bacteria decreased in high-density ponds while the Simpson index was the opposite. Actinobacteria in high-density group was significantly lower than that of low-density group in both seasons ($P<0.05$). Proteobacteria was significantly higher than that of low-density group in the summer ($P<0.01$), while Bacteroides was significantly higher than that of low-density group in autumn ($P<0.05$). In terms of nutritional quality, muscle firmness, shear force, chewiness, reparability parameters and crude fat and crude protein contents of Japanese eels in high-density group were significantly lower than those in low-density ponds ($P<0.05$), while the moisture content was the opposite ($P<0.05$). In conclusion, compared to low-density ponds, parameters like water quality index, algal composition, bacterial diversity, fish body composition and nutrient content in high-density group showed negative effects, which together constituted the sensitive parameters of Japanese eel quality and its culture environment. Moreover, 2.13—2.17 kg/m² in summer seems to be an inappropriate density, which caused eutrophication and mild pollution in this study.

Key words: Stocking density; Nutritional quality; Texture; Changes of water quality; *Anguilla japonica*