

何绪刚,侯杰.池塘圈养模式研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):21-29.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.004

池塘圈养模式研究进展

何绪刚,侯杰

华中农业大学水产学院/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,武汉 430070

摘要 池塘养殖是我国水产养殖最主要的生产方式。针对传统散养池塘养殖废弃物过度积累、养殖水环境劣化等关键瓶颈问题,提出了能时时清除养殖固形废弃物、实现清洁养殖的圈养模式。该模式自成体系,包含圈养桶、圈养平台和尾水分离与处理等养殖装备,以及圈养池塘水体净化能力提升措施等,是一种养殖尾水零排放、节水、节地、节约饲料和人力成本、高产、高效的绿色健康养殖方式。圈养平台集成机械化、信息化、智能化等技术装备后,可构建具有中国特色的工厂化池塘绿色高效养殖模式。本文系统介绍了圈养模式提出的缘由、设施结构组成、实际圈养效果及养殖废弃物收集与处理效率、圈养综合效益等,展望了圈养模式发展趋势,以期今后圈养模式研究和应用推广提供思路 and 参考。

关键词 池塘;圈养;“零排放”;绿色健康;设施渔业;清洁养殖;智能化;数字渔业技术

中图分类号 S 964.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0021-09

我国水产品供给越来越依靠水产养殖^[1],池塘养殖作为水产养殖最主要的生产方式,2019年全国总产量已达2 480.40万t,占养殖总产量的48.84%^[2];在湖库退出精养的当下,池塘养殖比重将进一步增大。因此,如何提高池塘养殖综合效益已成为业内焦点。我国延续数千年的养鱼模式是一种散养模式,即鱼类自由活动于整个养殖水体。在放养密度加大、水体承载的鱼类数量超过其自净能力的情况下,残饵、粪便等养殖废弃物过量堆积^[3-4],引起养殖水环境劣化^[5-6],进而带来病害频发、用药量大、养殖综合效益低下等一系列制约水产养殖可持续发展的瓶颈问题。为破解上述难题,“跑道”^[7]、集装箱^[8]、圈养^[9]等养殖新模式应运而生。圈养模式因养殖固形废弃物排出率高,生态、经济和社会效益等综合效益好,倍受养殖者关注,被农业农村部遴选为2019年、2020年重大引领性农业技术。

本文梳理了池塘圈养模式发展历程、圈养系统结构、实际运行效果和综合效益等,并就圈养模式发展趋势进行展望,以期今后圈养模式研究和应用推广提供参考。

1 圈养模式的提出

1.1 圈养缘由及工作原理

当前养殖池塘普遍采用的高密度放养、大量投饲精养方式,不可避免会面临氮、磷大量积累问题。由于磷无毒,磷堆积于池塘不会对养殖对象产生直接的毒害作用,因而在池塘内环境治理中,磷并不是治理的主要对象。氮素则不同,由于氨氮、亚硝态氮等对养殖对象有强毒副作用,其浓度过高时会引发养殖对象中毒或免疫力低下或诱发疾病等,因此,有害氮素成为池塘内环境治理的重点。占池塘氮素来源70%~90%的饲料,其氮素利用率普遍很低,通常养殖对象仅能吸收利用20%~25%的饲料蛋白^[3],饲料中剩余的氮化合物以残饵、粪便及其分解物^[10]以及养殖对象代谢物^[4]等形式进入养殖环境。大量投饲导致过度积累的氮素,又随养殖尾水排放到河流、湖泊,引起接纳水体富营养化进程加快,进而造成水环境劣化和水生生物多样性等发生结构性改变^[5-6]。所以,如何减少和转化精养池塘有害氮素,不仅关乎健康养殖成败,也关乎我们赖以生存的淡水生态环境健康。

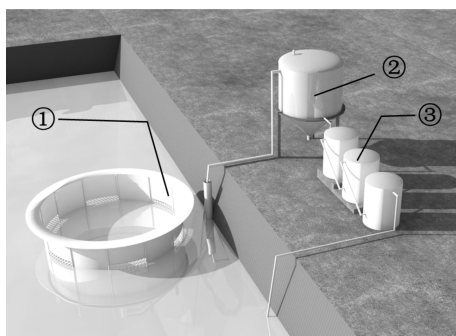
收稿日期:2021-04-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0900302);2018—2021年湖北省农业科技创新行动项目;中央高校基本科研业务费专项(2662020SCP001)

何绪刚,E-mail:xgh@mail.hzau.edu.cn

目前,应对精养池塘有害氮素的方法可归纳为原位修复和异位修复两大类。原位修复技术主要有增氧、底泥清除、生物浮床、微生态制剂、生物絮团和滤食性鱼类转化等^[11-13];异位修复技术主要有人工湿地^[14]、渔-农复合种养^[15]、生态沟渠等^[16-17]。上述修复技术虽然可以一定程度削减池塘水体或底泥已经堆积的氮素,但并不能从根本上减少池塘氮污染源——残饵、粪便及养殖对象氮代谢产物。究其原因,是传统散养模式造成的。散养于池塘的水产动物,整个池塘都是其排泄场所,目前还没有办法及时收集和清除遍布于整个池塘的残饵、粪便及氮代谢产物。所以,要想从根本上治理有害氮素污染,需要从养殖模式上加以革新^[9,18]。

基于上述分析,本研究团队本着“时时打扫卫生”的理念于2016年提出了圈养模式(图1)。池塘圈养属于设施渔业,主要包含圈养桶、增氧及捕捞等支持设备、集排污设备、圈养平台和尾水处理设备等养殖装备,并采用一定的技术措施提升圈养池塘水体自净能力。



①圈养桶;②尾水分离塔;③尾水处理桶。①Juanyang bucket;
②Solid liquid separator; ③Wastewater treatment bucket.

图1 圈养模式图

Fig.1 Pattern diagram of Juanyang system

池塘圈养的工作原理是:将养殖对象圈在圈养桶内饲养,残饵、粪便等固形废弃物自然下沉聚集于圈养桶下方锥部排污管口附近,每天定时开启排污水泵,抽排残饵、粪便等固形废弃物至尾水分离塔,沉淀分离后的固形废弃物可用于制作有机肥等资源化再利用,去除固形废弃物的上清液再经人工湿地脱氮除磷处理后,回原池重复使用;养殖对象的尿液等代谢废物,则需依靠池塘水体自净能力加以净化。池塘养殖由散养模式转变为圈养模式后,可实现清水养殖,养殖水环境得到根本改善,因而病害和用药量大幅减少,养殖产品品质得以提升。在圈养容量

合理、圈养池塘水体自净能力强化提升前提下,可实现圈养池塘养殖尾水零排放。

1.2 发展历程

圈养模式雏形于2016年提出,经反复推敲确定了圈养模式技术路线和总体布局,明确了圈养桶结构形式及下部锥部角度等关键参数。2017年开始小试,主要验证了圈养可行性和排污效率。2018年,圈养关键设施装备化,并进入中试阶段;2020年进入批量推广阶段。至今,圈养模式仍在不断优化之中。2020年12月湖北省农业农村厅发布了《装配式水产养殖圈养设施》(DG42/Z 004—2020)农业机械专项鉴定大纲,有力促进了圈养设施标准化。

2 圈养设施

2.1 圈养系统

圈养模式是一个系统工程,不仅包括圈养平台、圈养桶、尾水分离塔等设施装备,还包括圈养池塘水体自净能力的提升^[9]。圈养模式要求养殖水体透明度全年不低于60 cm,因此需要采取一定措施提高水体氮、磷自净化能力。主要措施有:(1)挂生物刷1 000~2 000个/667 m²,生物刷长度不低于1 m、毛长不小于10 cm;(2)种植四季常青的沉水植物,如苦草等,种植面积一般为养殖池塘面积的20%~30%;(3)放养鲢、鳙150~200尾/667 m²,规格不小于150 g/尾;(4)圈养池塘圈养区域以外的水体,不再投饵、施肥。

2.2 圈养桶

上部圆柱形,下部圆锥形,直径4 m,高3 m,总容积30 m³,有效养殖水深(1.7±0.1) m,有效养殖水体约20 m³;桶口以下40~80 cm处开透水孔3 200个,孔径1.5 cm;圆锥体底部设排污管;圆柱体与圆锥体交汇处设防逃网,防逃网上方设捕捞网。

圈养桶直径不宜超过4 m。直径越大,排污效率越低。一般每667 m²水面安装4个圈养桶。

2.3 尾水分离塔

形状与圈养桶类似,直径1.8 m,高1.9 m,总容积6 m³。圆锥体底部设排污管;圆柱体与圆锥体交汇处设出水管,以排出上清液。

一般每4个圈养桶配置1个尾水分离塔。含固形废弃物的黑水被抽排入尾水分离塔,静置沉降1 h后,绝大多数固形废弃物下沉到尾水分离塔下部圆

锥体处,此时便可排出上清液进入尾水处理桶净化处理。

2.4 尾水处理桶

尾水处理桶为1 t 聚乙烯平底桶。一般采用下进水、上出水方式3级串联使用。尾水净化处理方法有硝化-反硝化^[19]、生物絮团+硝化/反硝化^[20]、潮汐流人工湿地^[21]等多种工艺。

2.5 圈养平台

圈养平台用于固定圈养桶并形成人行、管理通道,可分为固定式平台和浮式平台2种类型。圈养平台最初采用镀锌钢管焊接,后逐渐发展为平台标准件。标准的固定式平台主体为热镀锌钢质框架+格栅,采用螺栓连接、双立柱形式。标准的浮式平台由聚乙烯浮块标准件拼接构成。

2017年实测结果表明,鳊(*Aristichthys nobilis*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)圈养系统固形废弃物排出率分别为93.17%±1.89%和96.65%±1.46%^[22]。

高效排污,可大大提升池塘养殖容量。可按下式计算池塘养殖容量:

$$\text{池塘养殖容量} = \frac{\text{池塘承载力}}{1 - \text{排污效率}} \times 100\%$$

目前,学者界对池塘养殖容量的研究还很薄弱,尚未得出池塘承载力相关参数。参照相关学者研究结果^[23],并广泛咨询经验丰富的养殖专家和农户,将经验数据500 kg/667 m²视为我国混养池塘承载力的近似值。即,当池塘存塘鱼密度为500 kg/667 m²时,池塘水体自净能力是可以满足500 kg鱼生活产生的废弃物,也就是说在此养殖密度下,池塘水环境可以自我维持,不人为调节也不会劣化。若取池塘承载力为500 kg/667 m²,按照上述池塘养殖容量公式计算,当排污效率达到90%时,池塘养殖容量可达5 t/667 m²;当排污效率达到95%时,池塘养殖容量可达10 t/667 m²。上述养殖容量的前提条件是水环境质量可以自我维持,无需人为调控。

由于圈养模式固形废弃物排污效率可达90%以上,综合考虑溶解态养殖废弃物的污染,圈养池塘养殖容量亦可达到4 t/667 m²水平。如果圈养单产按1 000~1 250 kg/圈计算,则每667 m²池塘圈养数量宜为4圈。这种圈养强度,池塘水体自净能力可以应对未抽排出、滞留于池塘的养殖废弃物,不会因过度养殖而引发水质劣化问题。

2.6 增氧、排污等其他设施

圈养增氧一般采用微孔增氧方式。微孔增氧管盘成圆形,固定于捕捞网底部框架上,沿圈养桶壁布置1圈即可。如此布置,可形成从四周向中央聚集的气泡,有利于残饵、粪便向圈养桶中部汇聚、直接下沉到圈养桶锥部。每个圈养桶配备功率约300 W空气压缩机即可满足增氧需求。

排污设施由排污水管、自吸泵组成。可多个圈养桶共用1台自吸泵。

3 圈养效果

3.1 排污及尾水净化效果

1) 排污率。养殖固形废弃物排出效率可采用如下方法和计算公式进行测试:

$$\text{固形废弃物排出效率} = \frac{\text{测试期间收集的固形废弃物干质量}}{\text{测试期间投喂饲料干质量} \times (1 - \text{饲料表观消化率})} \times 100\%$$

养殖技术对养殖容量的提升作用毋庸置疑。几乎每次重大技术革新,都会提升养殖容量2~5倍(图2)。从技术层面而言,鱼类人工繁殖技术的突破,才将水产养殖带入现代养殖时期^[24]。但直至20世纪80年代,池塘每667 m²产量约150 kg;20世纪90年代前后,随着农村电力基础设施的改善、增氧机广泛使用,池塘养殖产量迅速提升到500 kg/667 m²左右;此后,人工配合饲料技术成熟和普遍使用,池塘养殖产量稳定在1~3 t/667 m²^[25](图2)。若想继续突破当前养殖容量限制,需要从模式变革入手,将传统散养模式革新为具有高效排污特征的圈养等设施渔业模式,则池塘养殖容量将继续提升2~4倍,产量达到4~8 t/667 m²的水平。

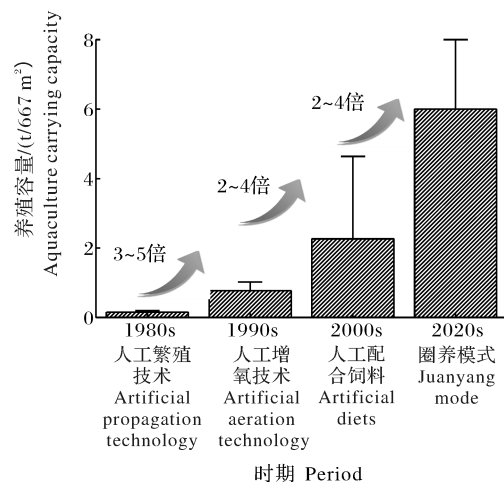


图2 养殖技术对养殖容量的贡献^[25]

Fig.2 Contribution of technology development to aquaculture capacity

2)尾水净化效果。圈养系统产生的养殖尾水首先排入尾水分离塔,在重力作用下,一定时间后,固形废弃物下沉到尾水分离塔下部锥形结构底部,集中收集后可用于资源化再利用。去除固形废弃物后的上清液,流入后续人工湿地净化系统,经微生物的脱氮除磷处理后,回流至池塘中重复利用,节约水资源,实现养殖污水零排放。

①尾水分离塔沉淀效果。为优化沉降时间,对分离塔中氮、磷等营养元素浓度进行了连续监测。如图 3 所示,沉降 1 h 后,总氮和总磷去除率可分别

达到 33.0% 和 68.2% 左右,此后总氮和总磷浓度基本稳定不变。不同于总氮和总磷,无机氮(铵态氮、亚硝态氮和硝态氮)和可溶性磷浓度在 12 h 沉降时间内无显著性变化,表明沉降作用对颗粒态有机氮和有机磷有较好去除效果,但对可溶性无机氮和无机磷去除效果较差。在圈养系统实际运行中,为了最大程度地实现养殖尾水的循环利用,尾水分离塔中养殖尾水需要 1 d 处理 1 次,综合考虑沉淀时间与后续湿地处理时间的相互影响,结合上述沉淀效果,得出最佳沉淀时间为 1 h。

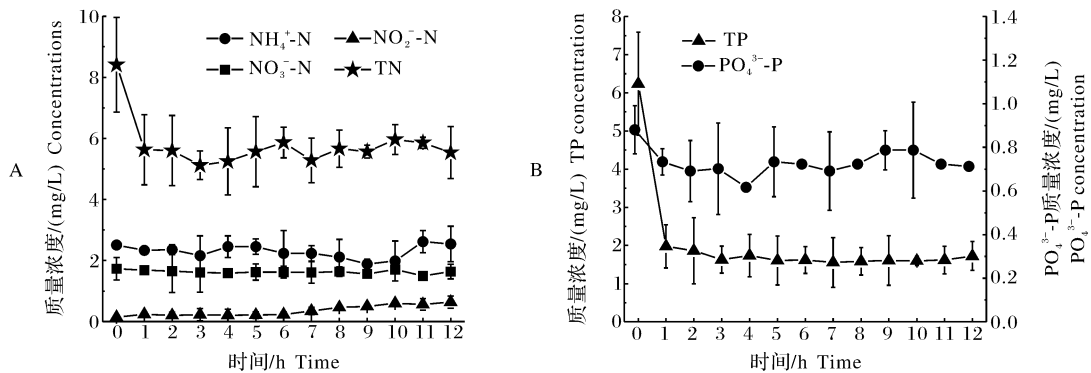


图 3 养殖尾水沉淀 12 h 氮(A)、磷(B)质量浓度变化

Fig.3 Variation of nitrogen(A) and phosphorus(B) concentration in solid liquid separator during 12 hours

得出最佳沉淀时间之后,以大口黑鲈养殖系统为代表,对尾水分离塔中养殖尾水的沉淀效果进行长期监测。结果如图 4 所示,进入尾水分离塔的养殖尾水总氮的质量浓度为 10.73~19.95 mg/L,总磷质量浓度为 3.64~6.39 mg/L,两者均显著高于普通精养池塘养殖尾水,表明圈养系

统集、排污系统可有效收集并去除养殖系统内氮、磷等污染物。经 1 h 沉淀后,上清液总氮质量浓度降为 8.19 ± 0.88 mg/L,总磷质量浓度降为 1.90 ± 0.23 mg/L,两者平均去除率分别为 46.9% 和 62.8%。但无机态氮经 1 h 沉降后降低较少,平均去除率仅为 5.7%。

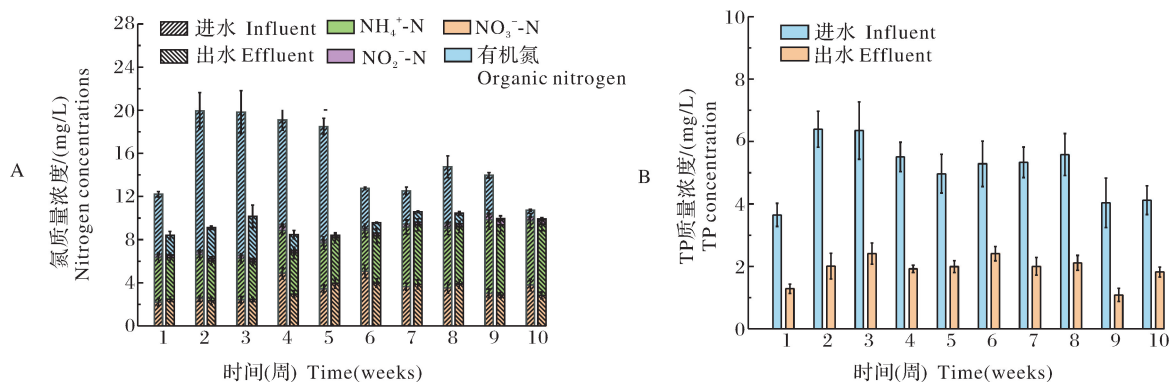


图 4 养殖尾水沉淀前后氮(A)、磷(B)质量浓度变化

Fig.4 Nitrogen(A) and phosphorus(B) removal performance in solid liquid separator

综上所述,养殖尾水在尾水分离塔中的最佳沉淀时间为1 h,经过沉淀处理后养殖尾水中总氮和总磷可大幅降低,但无机氮和无机磷浓度变化较小。

②人工湿地去除效果。养殖尾水经沉淀后,上清液经模块化人工湿地系统处理后回用。2018年至今,已相继试验开发了连续流曝气人工湿地、潮汐流人工湿地和异位生物絮团+曝气人工湿地等尾水

处理技术。其中,连续流曝气人工湿地系统因具有处理效果稳定、操作简便等优点,应用最为广泛。

下面以连续流曝气人工湿地为例,阐述尾水净化效果。

连续流曝气人工湿地采用下进水、上出水方式3级串联使用,其中A2和A4系统内充分曝气,A3系统不曝气维持缺氧状态(图5)。

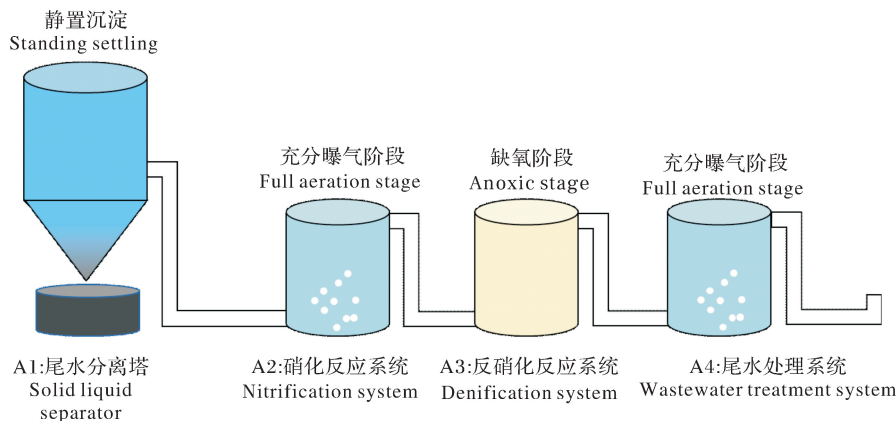


图5 连续流曝气人工湿地装置模式图

Fig.5 Schematic of the continuous flow aerated constructed wetlands

湿地净化效果如图6所示,经固液分离塔沉降初处理后,人工湿地进水铵态氮和亚硝态氮质量浓度分别为 4.76 ± 0.53 、 0.26 ± 0.03 mg/L,出水质量浓度分别为 0.82 ± 0.10 、 0.028 ± 0.003 mg/L,铵态氮和亚硝态氮去除率分别达到82.7%和89.3%,表明利用曝气方式可快速在其内部建立完全硝化过

程,将对养殖对象毒害作用较大的铵态氮和亚硝态氮氧化为对养殖对象几乎无毒的硝态氮。相较于总氮,连续流曝气人工湿地总磷去除率较高,平均去除率可达到56.5%,主要是因为人工湿地基质为火山石,对于可溶性磷具有较强的吸附能力(图6)。

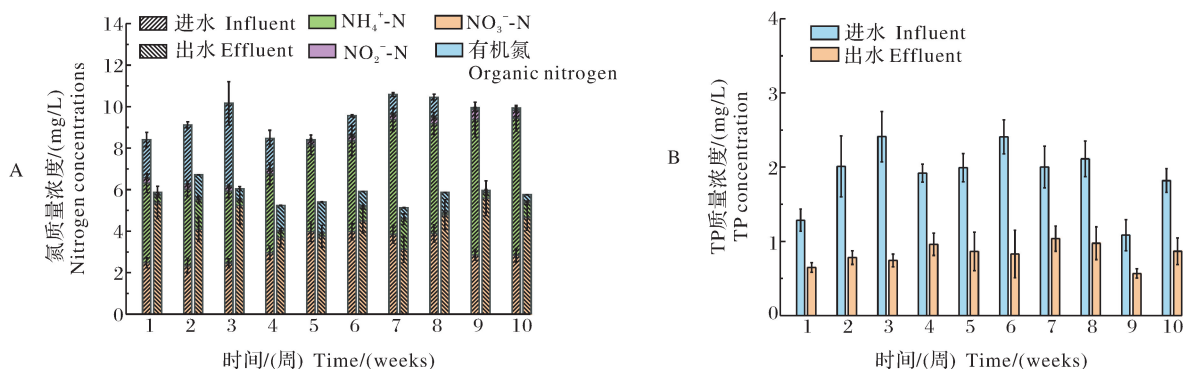


图6 连续流人工湿地中养殖尾水氮(A)、磷(B)质量浓度变化

Fig.6 Nitrogen (A) and phosphorus(B) removal performance of aerated constructed wetlands

综上所述,经尾水分离塔+连续流曝气人工湿地处理,尾水总氮和总磷去除率分别达到62.4%和83.8%,回用尾水中铵态氮和亚硝态氮质量浓度分别仅为0.82 mg/L和0.03 mg/L,可100%回用,实现水资源循环利用。

3.2 养殖效果

2017年至今,已试验圈养过大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)^[26-28]、鳊 (*Siniperca chuatsi*)、翘嘴鲇 (*Culter ilishaeformis*)^[29]、泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*)、黄颡鱼 (*Pseudobagrus fulvidra-*

co)、长吻鲃(*Leiocassis longirostris*)、花鲢(*Hemibarbus maculatus*)^[30]、乌鳢(*Channa argus*)、鳊^[22]、草鱼^[22,31]、鲫(*Carassius auratus*)和团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[31]等十多种鱼类,均表现出良好的摄食和生长效果。说明圈养的适应性较好,适合圈养的对象广泛。

本文以大口黑鲈为例,阐述圈养实际效果。

2019年5月17日在华中农业大学2号水产教学实训基地7号池塘(面积1160 m²)进行了大口黑

鲈适宜圈养密度试验。大口黑鲈初始体质量 9.71 ± 3.75 g,设置1000尾/圈(50尾/m³)、2000尾/圈(100尾/m³)和4000尾/圈(200尾/m³)3个密度梯度,每个密度3个重复。经180 d养殖至2019年11月16日,3个密度组终产量分别为 352.84 ± 32.54 kg/圈(17.64 ± 1.63 kg/m³)、 650.17 ± 29.77 kg/圈(32.51 ± 1.49 kg/m³)和 1197 ± 82.52 kg/圈(59.85 ± 4.13 kg/m³);3个密度组鲈终体质量为 458.75 ± 13.94 、 402.67 ± 29.60 和 348.01 ± 24.96 g(图7)。

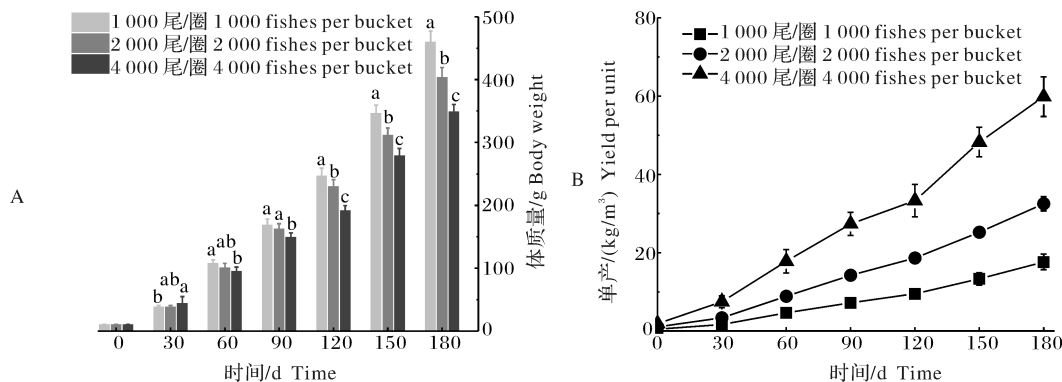


图7 圈养大口黑鲈生长(A)与产量(B)情况^[26]

Fig.7 Growth rate(A) and yield(B) of *Micropterus salmoides*

圈养结果表明,圈养密度越低,大口黑鲈生长速度越快,这符合养殖一般规律;而圈养密度越大,单位产量越高。因此,应综合考虑生长速度和目标产量来确定圈养适宜密度。以大口黑鲈为例,若追求快速生长,则成鱼圈养密度宜为1500~2300尾/圈;若追求更高产量,则圈养密度宜为2700~3200尾/圈。

总之,均衡考虑生长速度和目标产量、采取适宜的密度圈养时,单个圈的大口黑鲈养殖效果与散养池塘667 m²的养殖效果基本相当。草鱼^[31]、团头鲂^[31]、翘嘴鲌^[29]等其他鱼类圈养试验也得到类似结论。因此,在圈养实际生产中,可用散养池塘667 m²放养量和单位目标产量作为单个圈养桶的适宜密度与产量的参考值。

4 圈养综合效益

以本文“3.2 养殖效果”大口黑鲈圈养密度试验结果,按每667 m²池塘4个圈的圈养强度概算综合效益,并与武汉市周边有代表性的两口大口黑鲈散养池塘对比。结果表明,池塘圈养模式综合效益大幅高于池塘散养模式(表1)。主要表现在如下几方面:

1)显著节约水资源。适宜密度圈养的水资源消耗量不足1 t/kg鱼,仅不到散养模式的1/5。这得益于圈养池塘无需换水,养殖尾水循环使用,仅在池塘渗漏或蒸发水位降低时适当补充新水即可。这对人均水资源占有量仅为世界人均水平1/4的我国来说,节水意义重大。

2)显著节约饲料。圈养饵料系数比散养饵料系数低0.2以上,大幅减少饲料投入,降低养殖成本。圈养24 h增氧,且水体透明度高,优良的养殖水环境提高了鱼类对饲料的吸收利用效率。

3)增产、增效效果显著。适宜密度圈养后,综合养殖成本下降,单产和单位水面利润率是散养池塘的2~5倍,显著提高了土地使用效益。因此,节地、增效效果显著。

4)能耗下降空间较大。适宜密度圈养的耗电率与散养池塘基本相当。圈养采用微孔增氧方式,约80%做功能耗是在将空气中的氮气打入水体,为无用功。如果优化增氧方式和技术,尽量减少无用功,能耗将大幅下降。

5)降低人力成本效果显著。圈养模式无需拉网捕捞,大幅减少临时用工数量,提高了劳动效率。

表 1 圈养与散养综合效益对比^[27]

Table 1 A comparison of comprehensive benefit between Juanyang system and conventional aquaculture pond

项目 Item	池塘圈养/(尾/圈) Juanyang pond			池塘散养/(尾/667 m ²) Conventional aquaculture pond	
	1 000	2 000	4 000	2 000	3 350
养殖周期/d Culture cycle	180	180	180	188	189
单产/(kg/667 m ²) Per unit yield	1 405	2 599	4 780	606	1 104
饵料系数 Feed coefficient	0.88	0.89	0.76	1.21	1.11
耗电量/(kW·h/kg) Power consumption	5.08	2.76	1.50	1.62	1.69
水消耗量(t/kg) Water consumption	1.28	0.69	0.38	4.48	3.14
养殖成本/(元/kg) Aquaculture cost (¥/kg fish)	25.45	21.13	17.43	24.06	21.65
产品单价/(元/kg) Product unit price (¥/kg fish)	30.0	30.0	30.0	36.0	29.91
利润率 ¹ /(元/kg) Profit margin ¹ (¥/kg fish)	4.55	8.87	12.57	11.77	8.35
利润率 ² /(元/667 m ²) Profit margin ² (¥/667 m ²)	6 418.27	23 058.35	60 178.08	7 233.7	9 313.1

5 展 望

圈养模式自中试以来,表现出优质、高效、环保、生态等显著优势,是一种对社会、消费者、生产者和产业高度负责的绿色养殖模式。对社会而言,可以做到养殖尾水零排放、清洁生产,大幅节约土地和水资源;对消费者而言,为之提供可以和水库等大水面水产品相媲美的低药残、低土腥味、高品质的优质水产品;对生产者而言,可以大幅降低养殖成本和劳动力支出,提高生产效率,实现高效生产;对产业而言,可以促进水产养殖产业向机械化、信息化等工业化转型,促进产业可持续绿色发展,因此是高度负责的养殖模式。

圈养模式毕竟是刚刚出现的全新养殖方式,仍存在很多不足,比如增氧效率不高,圈养技术尚待完善,机械化程度较低等。作为一种可推进水产养殖产业工业化转型的养殖平台,需要不断完善和整合集成相关设施渔业先进技术。未来,圈养模式研究和应用,应重点聚焦于以下几个方面:

第一,研究高密度圈养下养殖对象生物学特征、养殖水环境关键因子与养殖对象的互作机制、病原及病害发生规律、品质形成机制与调控机制等,构建圈养基础理论体系。

第二,研发圈养及尾水净化技术与装备、多元信息智能立体感知技术与装备、高效增氧技术与装备、精准饲喂技术与装备、水质智能调控技术与装备、机械化捕捞技术与装备、智慧渔场技术与装备等关键

技术和装备,创立具有中国特色的工厂化池塘绿色高效养殖模式与技术体系,形成无尾水排放、无能源输入和无人值守的先进生产方式。

第三,研究重要养殖对象清水圈养技术、病害绿色防控技术、养殖尾水管控与净化技术等,建立圈养技术规范。

第四,研究数字渔业技术、圈养品质调控技术、保鲜与储运技术、初加工与精深加工技术和可追溯体系等,形成产供销一体化品质管控技术体系。

参考文献 References

- [1] CHANG Z Q, NEORI A, HE Y R, et al. Development and current state of seawater shrimp farming, with an emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China: a review[J]. Reviews in aquaculture, 2020, 12(4): 2544-2558.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [3] KAGGWA R C, DAM A A, KIPKEMBOI J, et al. Evaluation of nitrogen cycling and fish production in seasonal ponds ('finger-ponds') in lake victoria wetlands, east Africa using a dynamic simulation model[J]. Aquaculture research, 2010, 42(1): 74-90.
- [4] 姚峰, 甄恕基, 杨严鸣, 等. 养殖密度对异育银鲫氮和能量收支的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(3): 451-455. YAO F, ZHEN S Q, YANG Y O, et al. Effects of stocking density on

- nitrogen and energy budget of gibel carp[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2009, 36(3): 451-455 (in Chinese with English abstract).
- [5] 苗淑彦, 王际英, 张利民, 等. 水产动物残饵及粪便对养殖水环境的影响[J]. 饲料研究, 2009(2): 64-67. MIAO S Y, WANG J Y, ZHANG L M, et al. The influence of aquatic animal residual bait and feces on the aquaculture environments[J]. Feed research, 2009(2): 64-67 (in Chinese).
- [6] 黄世明, 陈献稿, 石建高, 等. 水产养殖尾水处理技术现状及其开发与应用[J]. 渔业信息与战略, 2016, 31(4): 278-285. HUANG S M, CHEN X G, SHI J G, et al. Review on status of wastewater treatment technologies and their development and application in aquaculture[J]. Fishery information & strategy, 2016, 31(4): 278-285 (in Chinese with English abstract).
- [7] 周恩华. 低碳高效池塘循环流水养鱼技术[J]. 中国水产, 2013(11): 83-84. ZHOU E H. Pond circulating flowing water fish culture technology with low-carbon and high-efficiency [J]. China fisheries, 2013(11): 83-84 (in Chinese).
- [8] 刘波. 集装箱循环水养殖技术[J]. 黑龙江水产, 2019(2): 33-35. LIU B. Container circulating aquaculture technology[J]. Heilongjiang fisheries, 2019(2): 33-35 (in Chinese).
- [9] 何绪刚. 圈养技术池塘“零排放”绿色高效[J]. 科学养鱼, 2019(9): 16-17. HE X G. “Zero discharge” green and high efficiency in captive culture pond[J]. Scientific fish farming, 2019, (9): 16-17 (in Chinese).
- [10] 卓华龙, 沈庞幼, 吴雄飞, 等. 象山港网箱养殖鲈鱼残饵和排粪情况初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(5): 443-447. ZHUO H L, SHEN P Y, WU X F, et al. Preliminary calculations on residual feed and faeces of *Lateolabrax japonicus* cultured in the net cages in Xiangshan Bay[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(5): 443-447 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张佑青, 江兴龙, 郑伟刚. 生物絮团技术在水产养殖中的应用研究[J]. 渔业现代化, 2016(6): 33-38. ZHANG B Q, JIANG X L, ZHENG W G. The research progress of biofloc technology in aquaculture[J]. Fishery modernization, 2016(6): 33-38 (in Chinese with English abstract).
- [12] PANWICHIAN S, KANTACHOTE D, WITTAYAWERASAK B, et al. Factors affecting immobilization of heavy metals by purple nonsulfur bacteria isolated from contaminated shrimp ponds[J]. World journal of microbiology & biotechnology, 2010, 26(12): 2199-2210.
- [13] 孟睿, 何连生, 胡翔, 等. 生态修复技术处理水产养殖废水[J]. 中国水产, 2008(10): 46-47, 80. MENG R, HE L S, HU X, et al. Ecological restoration techniques to deal with the waste resulting from aquaculture [J]. China fisheries, 2008(10): 46-47, 80 (in Chinese).
- [14] 吴振斌, 李谷, 付贵萍, 等. 基于人工湿地的循环水产养殖系统工艺设计及净化效能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 129-133. WU Z B, LI G, FU G P, et al. Technological design and purification performance of recirculation aquaculture system based on constructed wetlands[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2006, 22(1): 129-133 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陶玲. 稻田-池塘复合循环水养殖系统调控效应及其作用机制研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017. TAO L. Regulating effects and functional mechanism of integrated paddy-fishpond system for recirculating aquaculture[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [16] 顾兆俊. 淡水池塘四种生态沟渠净化效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015. GU Z J. Freshwater ponds four ecological ditch purification effect research[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘兴国. 池塘养殖污染与生态工程化调控技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. LIU X G. Study on pond aquaculture pollution and ecological engineering regulation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [18] 周治山. 优先调整池塘养殖模式推进水产健康养殖[J]. 中国水产, 2014(8): 75-78. ZHOU Z S. Prioritize adjustment of pond aquaculture mode to promote healthy aquaculture[J]. China fisheries, 2014(8): 75-78 (in Chinese).
- [19] NAYLOR S, BRISSON J, LABELLE M A, et al. Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate[J]. Water science & technology, 2003, 48(5): 215-222.
- [20] FATIMAH N, PANDE G S J, NATRAH F, et al. The role of microbial quorum sensing on the characteristics and functionality of bioflocs in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 2019, 504: 420-426.
- [21] HU Y S, ZHAO Y Q, RYMSZEWICZ A. Robust biological nitrogen removal by creating multiple tides in a single bed tidal flow constructed wetland[J]. Science of the total environment, 2014, 470/471: 1197-1204.
- [22] 王海鹏. 池塘圈养系统构建及其养殖效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. WANG H P. Study on the construction and aquaculture effect of pond Juanyang system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [23] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 珠三角养殖池塘水质模型建立及其应用研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(1): 119-124. ZHOU J F, WEN Y M, LI Y C. Establishment of water quality model of farming ponds in the pearl river delta and its application[J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(1): 119-124 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘筠. 中国养殖鱼类繁殖生理学[M]. 北京: 农业出版社, 1993. LIU J. Reproductive physiology of Chinese farmed fishes[M]. Beijing: Agriculture Press, 1993 (in Chinese).
- [25] 李家乐. 池塘养鱼学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2020. LI J L. Pond fish culture[M]. Second edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2020 (in Chinese).

- [26] 张奇. 圈养模式下养殖密度对大口黑鲈生长、生理指标以及肌肉品质影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. ZHANG Q. Study on the effects of stocking density on growth, physiological indexes and muscle quality of *Micropterus salmoides* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [27] 廖伟坚. 池塘圈养模式的综合效益分析与评价——以大口黑鲈为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. LIAO W J. Analysis and evaluation of comprehensive benefits of pond juanyang model——based on largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [28] 卢建超. 2 龄大口黑鲈养殖性能和性腺退化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. LU J C. Study of culturing performance and degeneration of two-year old *Micropterus salmoides* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李学华. 池塘圈养和散养翘嘴鲌肌肉品质的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. LI X H. Comparative study on muscle quality of juan yang and traditional pond farming *Culter alburnus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨军, 艾健, 杜其松, 等. 池塘“零排放”圈养模式养殖花鲢试验[J]. 水产养殖, 2020(3): 19-24, 30. YANG J, AI J, DU Q S, et al. Culture experiment of the *Hemibarbus maculatus* with “Zero Emission” captive culture mode of pond [J]. Aquaculture, 2020(3): 19-24, 30 (in Chinese with English abstract).
- [31] 李绍迪. 池塘工程化圈养系统的构建及养殖密度对草鱼和团头鲂生长性能的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. LI S D. Different culture densities in engineering captive pond Juanyang system effects on growth performance and muscle quality of *Ctenopharyngodon idellus* and *Megalobrama amblycephala* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).

Research progress on pond Juanyang mode

HE Xugang, HOU Jie

College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/Engineering Research Center, Ministry of Education for Green Development of Aquatic Biological Industry in Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430070, China

Abstract Intensive pond culture is the main aquaculture mode in China. In view of the key bottleneck such as excessive accumulation of pollutant and deterioration of aquaculture environment in traditional aquaculture ponds, we put forward a novel aquaculture mode, the Juanyang system, which can timely remove the solid waste out of the aquaculture pond and realize clean production. The Juanyang system, which includes culture bucket, platform, solid waste collection system, wastewater settle and treatment systems, is a totally new aquaculture mode with advantages of low labor and land requirement, water and feeding saving, zero wastewater discharge, high quantity and quality of production. The Juanyang system provides a good platform for integrating mechanization, informatization and industrialization into aquaculture, and lays a solid foundation for promoting the green and high efficiency aquaculture development in China. This paper systematically introduced the motivation for invention, the facility structure of the system, the quantity and quality of aquaculture products, the collection and treatment efficiency of pollutant, and the comprehensive benefits of the Juanyang system. We also presented the development trend of the Juanyang system in hoping of providing research and application direction in the future.

Keywords aquaculture pond; Juanyang system; zero wastewater discharge; green and health; facility aquaculture; clean farming; intelligentize; digital fisheries technology

(责任编辑: 边书京)