

文章编号:1000-0615(2013)11-1750-11

DOI:10.3724/SP.J.1231.2013.38751

· 综述 ·

工业化循环水福利养殖关键技术与智能装备的研究

黄 滨¹, 刘 滨¹, 雷霖霖^{1*}, 翟介明², 颜阔秋³, 梁 友¹

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所,农业部海洋渔业可持续发展重点实验室,山东 青岛 266071;

2. 莱州明波水产有限公司,山东 莱州 264000;

3. 金贝尔(福建)水环境工程有限公司,福建 宁德 352100)

摘要: 基于水产福利养殖的理念,结合封闭循环水系统养殖环境可控性高的突出特点,倡导构建适合中国国情的工业化循环水福利养殖产业模式,已成为推动我国现代渔业可持续发展的战略需求。为此,本综述从工厂化循环水鱼类养殖福利影响因子分析、集约化养殖鱼类的福利需求、工厂化循环水模式下水产福利养殖的科学评价标准制定等方面入手,开展了封闭循环水系统实施福利养殖的关键技术与智能装备集成的研究,为今后规范我国水产工业化福利养殖的生产过程管控,建立水产福利养殖保障机制,真正提高水产品质量与安全水平提供理论和依据。

关键词: 水产福利养殖;工业化;循环水;智能;装备;关键技术

中图分类号: S 968.22

文献标志码: A

近年来,随着中国集约化养殖规模的不断扩大和人民生活水平的快速提升,由食物引发的安全问题时有发生,因此人们对于食物质量和自身健康问题表现出高度关注,不仅对动、植物源食物的安全性和品质十分重视,还对深层次的食物原材料生产过程是否规范化、药物残留控制、养殖动物的健康与福利状况等环节均不断提出更多、更高的要求。如果养殖动物的生存条件得不到基本保障,比如在高密度饲养条件下,动物的活动空间受限,环境日益变得恶劣,盲目性用药等都会造成养殖动物机体免疫力下降,为疫病流行创造了条件,如当前频发的禽流感、猪链球菌病、猪流感等人畜共患疾病的传播,已危及到人类的健康甚至生命安全,引起了国际社会和中国政府的高度重视。就水产养殖而言,养殖鱼类如果经常遭遇各种恶劣环境因素刺激,长期反复接受胁迫,其死亡率便会明显增高,饲料转化率会下降,其产品质量就必然会降低,甚至有可能产生生物毒素污染环境 and 人类健康。目前市场上的野生鱼、散养的

鸡鸭、放牧的猪牛羊、有机蔬菜等绿色健康产品之所以倍受青睐,就足以看出人们对于绿色健康食品的迫切期待。因此,提高养殖动物的福利已不仅仅是人与动物和谐共存的需要,同时也是保障食物包括水产品质量安全的需要,这是关系到国民身体健康和子孙后代幸福的重大研究课题,所以必须引起高度重视。

动物福利(animal welfare)一词源于20世纪60年代初,主要是针对畜牧业集约化生产中出现的而提出的,如疾病增多、机体损伤加剧、死淘率上升、异常行为频发等,人们为此提出应该在保证畜禽正常生产的同时,充分重视畜禽的福利状况,以提高畜禽在生产过程中的福利水平^[1]。Broom^[2]在《动物福利差的指标》中给出了以下定义:动物福利是指动物试图适应环境而表现出的状态。动物福利包涵动物的个体感觉和它们对于快乐、痛楚、挫折、饥饿以及其它的一些生理状态,很难有确切的定义和衡量的方法^[3]。动物福利是一个比较宽泛的概念,包括动物生理上和精神

收稿日期:2013-06-03 修回日期:2013-09-01

资助项目:公益性行业(农业)科研专项(201003024);鲜鳃类产业技术体系专项(CARS-50)

通信作者:雷霖霖,E-mail:leijl@ysfri.ac.cn

上两方面的康乐^[4]。Hungtingford^[5]认为动物福利为动物在没有痛苦的状态下生活。Broom^[6]认为,动物福利是其个体企图适应环境的一种状态。近年来维护动物福利得到了西方各国政府的普遍认可。欧美等国都相继制定了动物福利法,例如,欧盟制定了一系列新规定,从2004年开始,市场上出售的鸡蛋必须在标签上标明是“自由放养的母鸡所生”还是“笼养的母鸡所生”。而欧盟目前通用的每个450 cm²的鸡笼格到2013年要被更大的鸡笼格所替换。同时,欧盟通过了在其成员国实施的指导条例,规定到2013年,欧盟各成员国要采用放养的方式养猪,停止圈养等^[7]。近五年来,在水产福利养殖研究领域,欧洲和美国的科学家已开始在水产福利养殖与循环水养殖条件下,开展了虹鳟和大菱鲂等鱼类养殖福利方面的对比研究并取得了一些成果。比如在循环养殖条件下,分别对不同水交换率^[8]、不同放养密度^[9]、不同臭氧浓度^[10-11]等状态中的养殖鱼类进行实验。从表观性状方面看,不同水体交换率、流速对畸形率、死亡率、游泳行为有影响^[10],从鱼鳍损伤可以提供相对简单和快速的指标用于评估鱼类福利;在养殖条件下胸鳍和背鳍比其他鳍能够更敏感地反映鱼类福利^[12]。从血液指标方面看,臭氧能够提高虹鳟的生长性能并且不会显著影响动物健康和福利^[11]。从神经内分泌方面看,当遇到急性拥挤胁迫(不同密度)时,各实验组中血浆皮质醇浓度均显著增加,而下丘脑中5-羟色胺在不同密度实验组中没有发现显著性差异^[13]。从生物标志物方面看,与肝脏相比,腮内的生物标志物更加适合于研究臭氧对大菱鲂动物福利的影响^[14]。由此可以发现一些代表性指标与鱼类的养殖福利密切相关。目前动物福利的理念在国内猪、牛、羊等畜牧业的养殖中已有所体现^[15-18]。但在水产业中,针对福利养殖的研究,特别是工业化循环水养殖模式下的动物福利的研究几乎空白,在我国尽快开展相关研究工作,以迅速提高工业化循环水福利养殖关键技术与智能化装备的水平,就显得非常必要和迫切。

1 水产福利养殖的定义及其实施的战略意义

水产福利养殖是指在养殖生产过程中为养殖对象提供一个符合其生物习性、适宜其生长和极

少胁迫的养殖环境,并有充足的饵料供给、病害防治措施和精准管控规程保障的养殖生产。而水产动物福利则是指人类在养殖基地、养殖过程、捕捞、运输水产养殖产品的各个环节中,影响养殖动物的活动^[19-20]。那么提供什么样的福利合适,这也是随着社会、技术和认识的进步而不断提高的。溯源人类成长的发展轨迹,祖先们从原始状态的严寒酷暑、衣不遮体、饥饿疾病中繁衍下来,发展到现代人的衣食住行都达到较高标准的福利保障阶段,充分反映出了人类的智慧、文明的进步和福利的逐步提高。水产养殖生产中的动物福利同样也是这样,从一个角度讲,并不是原始的生存环境条件就是养殖动物的福利标准或典范,自然界的寒冷、高温、自然灾害等恶劣环境和动物的饥饿病害以及人类造成的水环境污染、过度捕捞等因素都时刻威胁着养殖动物的福利;从另一个角度讲,不能片面认为构建一个超脱实际生产和养殖效益的极端理想养殖生产过程就是水产动物福利的最高境界,当今的水产动物福利应侧重于动物自身感受、强调动物的健康生长,是一种先进理念与技术的高度融合,并与社会发展的进程和谐统一。可以说,水产福利养殖是一项人性化的综合性研究课题,福利养殖理念是健康养殖的核心和基础,研究养殖福利是以研究健康养殖模式为前提。就鱼类养殖而言,养殖水环境条件、养殖技术与过程管控是鱼类福利的主要影响因素,在保证养殖鱼类正常生产的同时,应该充分重视鱼类的福利状况,提高鱼类生产过程中的福利水平和健康状况,以提高养殖鱼类的品质,达到为社会提供优质、安全的水产品的目的。

工业化循环水养殖是指在全人工控制条件下的水产养殖生产,是养殖生产的工业化,它集成了相当多的设施、设备,拥有将水温调控、水质过滤杀菌和循环利用等多种技术手段,使养殖水产动物处于一个相对被控制的生态环境中,是集约化生产状态下,可程序化管理的养殖系统。该养殖系统具有生产效率高、养殖环境可控、节水、节地、节能减排的特点,是渔业生产中工业技术应用水平最高的生产方式,被国际上公认为现代海水养殖产业的发展方向^[21]。由此可见,选择工业化循环水养殖模式实施水产福利养殖,相比其他受自然环境因素影响大、“靠天吃饭”的传统养殖模式,更具有环境可控制度高、管理精准的优势,是理

念与技术的挑战,体现了目前水产养殖业的前沿技术的水平,同时也对维系我国水产养殖业可持续发展与国民食品安全具有重大战略意义。

2 循环水福利养殖影响因子的分析

水产鱼类养殖由苗种—养成—加工—销售,需要经过一个较长的时空过程,从福利养殖角度考虑,在生产全程中所有不利或有害的因素都将使养殖福利受损而直接影响到养殖鱼类的健康成长;从时间的量化角度看,鱼类养成阶段占据了最重要的地位,因此提高养殖阶段福利尤显重要。对于循环水养殖条件下的福利养殖,优化水环境就成为最为直接的影响因子,同时它还与养殖管理、饲料营养、病害防治等因素有着十分密切的相关性。

2.1 养殖水环境

集约化养殖条件下的水环境,是对养殖鱼类产生直接胁迫的最主要影响因素。养殖水环境包括水质条件和环境条件。水质条件具体指水中所含的氨氮、亚氮、COD、pH、DO、OPR、盐度等指标;环境条件主要为温度、流速(变速)、流态、声、光、电等。水质条件差,特别是氨氮、亚氮指标高,对水产养殖鱼类危害严重。相当于人类生长在污染较严重的环境中,直接会导致人们的健康水平下降和疾病的侵入,从养殖鱼类感受角度来看,如果水环境导致健康水平下降了,便会表现出体质活力的减弱、生长缓慢、病害频发、成活率下降。因此,改善养殖水质条件是提高福利养殖的首要条件。

对于环境条件,不同种类的养殖鱼类具有各自不同的生物习性,即便是同一种水产养殖鱼类,在不同生长时期,对养殖池大小、水深、温度、流速(变速)、流态、声、光、电等也会有不同的要求。

2.2 养殖管理

人类对于动物福利研究的重视,已不单纯是追求动物生活的舒适度^[1]。同时还需要密切关注养殖动物在管理上的其他利好,比如养殖鱼类如果缺乏科学的饲养管控机制,养殖鱼类即使有了优秀的基因,也难以产生良好的生长响应。目前,对高密度养殖鱼类的理论研究依然十分缺乏,实际生产中养殖密度的制定一直以来始终是一个值得深入探索的棘手问题,如何既能获得最大生产效益,又能充分保障养殖动物福利是国内外学

者普遍关心的科学问题^[22];适当的养殖密度可以减少由于养殖鱼类身体接触造成的伤害,可以减少采食时的相互干扰和争抢的几率,减少躲避时的妨碍和降低疾病和寄生虫的传播。国外有些循环水养殖系统中养殖密度高达 100 kg/m³ 以上,国内循环水系统最高的才达到 60 kg/m³ 左右,虽然这和不同的养殖品种有很大关系,但总体水平来看,国外工厂化循环水养殖技术与装备水平远比国内高出许多。从辩证的角度看,集约化高密度养殖和福利养殖应该是既对立又统一的两个方面,单纯追求养殖的高密度,其急功近利的做法并不科学,它对发展一项正常、持久的大产业不利;完全忽视养殖动物对一定环境变化范围内机体良好的调节能力也是不足取的。在工厂化循环水养殖中提升养殖福利,首先必须有针对性地去设计密度实验,再结合不同养殖品种的生理指标进行养殖密度探索,方可为水产福利养殖提供可靠的科学依据。

另外,根据不同养殖对象的生物习性,探索制定不同生长阶段的投饲策略,采取定位、定时、定量、定质的精准投喂方案,避免产生过度投喂或投喂不足,这样一方面不仅能主动调动起养殖鱼类的食欲,满足其温饱福利,另一方面还会避免因过度投喂而影响健康和水质环境的败坏,引发病害的发生。同时为了减少养殖鱼类间的倚强凌弱,需定期实施大小养殖个体的分级、分养以及实施养殖全过程的科学管控等,都是提高饲料利用率、转化率和增强养殖鱼类福利水平、提高产量和质量的最有效方法。再者,减少人为惊扰应激,提高从业人员技能和素质,善待养殖对象,保持良好的环境卫生状况,严格执行养殖规程等,都能提高养殖的福利。

2.3 饲料与营养

养殖鱼类的温饱目前虽已不再是工厂化集约养殖的突出问题,但饲料与营养却永远是一个关系到养殖鱼类健康与快乐成长的重要福利影响因子。应按照不同养殖对象的生长周期、不同种类对蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等营养成分的需求,确定合理的饲料配方,以提高饲料转化效率;尤其是要研究投饲策略和智能投饲系统,实施精准投喂,避免出现养殖鱼类脂肪过高等亚健康状态的出现,以确保养殖产品的品质和质量安全。

2.4 病害防治

病害毋庸置疑是水产养殖的关键要害点,水产养殖鱼类遭受疼痛、伤病之苦是福利养殖的重要影响因子,严重时影响成活率,甚至导致养殖的失败。水产养殖动物遭遇病害侵袭似乎是不可避免的事情,关键是做好防疫、预警、预防和及时诊治疾病的工作,减少疾病的发生。基于鱼类行为的特征疾病预警与健康管理的减少水产养殖鱼类病害的关键技术,由于病害问题的发生是养殖动物、病原体和养殖环境三者之间相互作用的结果,加强对上述环节的管控,有利于预防病害发生^[22]。定期监控和记录鱼类健康状况,及早发现病鱼早期的行为表征,快速检测和精准判断疫病出现的早期症状,及时隔离准确用药,将病害疫情控制在可控范围内;另一方面应建立适宜的预警、远程病害诊断系统^[23]。在封闭循环水养殖系统中随意用药对水处理系统中的生物膜和有益菌的风险巨大,严重时会导致整个循环系统的崩溃,我们一直以来在研究中寻求一种针对封闭循环水系统科学合理的、可控性强的隔离诊治方法,具体是将出现预警征兆的养殖池隔离出循环系统,暂时实施流水养殖,对症施药,并使渔药和抗菌药等随流水排除到循环系统之外,彻底避免封闭循环系统病害的传播和用药对生物净化菌的伤害。

3 循环水福利养殖健康指标的优化与评价标准的探究

3.1 水产养殖动物福利的评价标准

动物福利并不是一个简单的概念,它涉及两个主要问题,即动物福利的意义或定义以及如何最好地、更客观地衡量动物福利^[24-26]。只有解决这两个问题,才能够准确、客观、全面地建立动物福利的评价标准,为了定义理想的动物福利状态,世界养殖动物福利协会(farm animal welfare council, FAWC)建立了“五大自由”的标准框架^[27]。这“五项基本原则”分别为“享有不受饥渴的自由,享有生活舒适的自由,享有不受疼痛、伤害和疾病的自由,享有生活无恐惧和悲伤感的自由,享有表达其正常行为的自由”。身体健康是最普遍接受的衡量良好福利的一个必要条件,然而良好的动物福利不仅仅是身体健康,还涉及到精神上是否痛苦^[28],这方面的福利,旨在了解动物的主观体验^[25]。然而由于科学界对于鱼及

其他水产养殖动物是否有能力体验到疼痛、恐惧和悲伤方面还存在一定的争议,因此目前对于水产养殖动物福利评价还主要集中在养殖动物生理健康指标上。

目前在水产养殖动物中对于养殖鱼类福利的生理指标研究要相对深入,因而对于其他水产养殖动物福利的评价研究也具有一定的借鉴价值。国内外相关研究已经证实,养殖鱼类福利在受到环境、生物等胁迫压力影响时,鱼体的生理性反应会经历三级阶段^[29]。一级阶段:嗜铬组织释放儿茶酚胺^[30-32]以及下丘脑—垂体—肾间组织轴(hypothalamus- pituitary- interrenal axis, HPI)被激活,刺激其分泌类固醇皮质激素并释放入血液循环系统^[33-36];二级阶段:由一级阶段中产生的各种激素所介导的生理和生化水平上的一系列变化,涉及呼吸、代谢、酸碱和渗透压平衡、免疫活性和细胞反应等几乎所有与鱼类生命活动相关的生理功能调节^[34,37-38];三级阶段:在二级阶段的生理、生化变化的基础上,整个养殖动物由于无法适应环境或其他压力所导致的生长缓慢、抗病能力下降、繁殖力差、活动力低甚至形态特征发生改变^[39-40]。

在养殖鱼类胁迫生理反应的三级阶段中,三级阶段作为结果是判断养殖鱼类在养殖系统中福利是否优劣的最直接标准,但是由于其表征往往大幅滞后于前两级阶段并且会导致较大的经济损失,因此在水产养殖动物福利的评价研究中逐步被取代。前两级阶段在动物福利的评价中具有预见性,能够及时反映养殖动物个体对于周围胁迫压力的调节及适应程度,因而具有重要的研究价值。近年来,对于水产养殖动物特别是养殖鱼类福利的评价标准也主要根据前两级阶段的生理指标变化予以实施。

3.2 水产养殖动物福利的评价方法

避免由于长期、反复胁迫压力带来的不良的后果是水产养殖福利追求的中心目标。因此,评估如何减少应激反应的潜在的方法,在水产养殖业是一个活跃的研究领域。大量文献已经证实,水产养殖动物特别是鱼类对于外界的胁迫会产生生理、生化和行为等一系列反应^[29,36-37,41-42],因此测量各类胁迫反应成为研究动物福利的重要内容^[43]。胁迫应激会引起鱼体血液中多种激素水平的变化,其中较常见的激素有皮质醇、肾上腺

素、生长激素、性腺激素等^[44-47]。鱼类的下丘脑—垂体—肾间组织轴(hypothalamus-pituitary-interrenal axis, HPI)在环境胁迫与鱼体的神经内分泌的联系中占主导地位^[43], HPI轴被激活后会刺激肾间组织释放皮质醇激素进入血液循环系统并导致鱼体内一系列的变化,如糖原储存消耗、血浆葡萄糖水平升高、肌肉活动增强和血浆乳酸升高等。环境胁迫也可根据反应时间的长短又常可分为急性胁迫和慢性胁迫,如捕捞和干扰等能够导致急性胁迫,而诸如水质恶化和高密度放养等会造成慢性胁迫,对于鲑、白胭脂鱼(*Castostomus commersoni*)的研究表明,短期胁迫如人为操作、追逐等通常会引起鱼体内血浆皮质醇浓度的显著升高^[48-50]。较长时间的胁迫,如24 h封闭下的海鲈和混养3 d的虹鳟^[51-52],均引起了血浆中皮质醇的持续高水平。但是在持续几个星期胁迫下的鲑中则发现血浆皮质醇水平在经过初期快速上升后最终又恢复到了最初的低水平^[53-54]。这些结果表明,单一测量血浆中皮质醇浓度并不适合于评估鱼类的慢性应激状态。与皮质醇激素相似,肾上腺素升高常出现于捕捞、装载和运输等产生的急性胁迫过程中,但是氨氮、重金属、可溶性原油等其它化学因子也都会造成血液肾上腺素含量增加,因此,皮质醇、肾上腺素能在一定程度上反映出急性胁迫下鱼体的应激状态和对环境的适应能力大小^[55]。生长激素和性腺激素受胁迫后产生变化所需要时间较长,常在慢性胁迫过程中有所表现,如饥饿胁迫^[56-65]等。

除了激素之外,血液中红细胞数量、白细胞数量、血红蛋白含量、细胞脆性及细胞直径等血液生理指标也会在胁迫影响下发生一定的变化^[66];血浆中的葡萄糖和乳酸水平经常与皮质醇一同用于评估胁迫应激水平^[8,67];血清中的许多酶成分也是反应鱼体胁迫状况的重要指标,包括超氧化物歧化酶(SOD)、碱性磷酸酶、溶菌酶、转氨酶等^[66]。

近年来,通过研究鱼体内胁迫相关基因的表达,进而筛选敏感的生物标志物用于评估胁迫应激程度并应用于改善鱼类福利已经成为新的研究热点,热激蛋白家族和生长激素家族以及抗菌肽家族等重要胁迫相关基因已经成功地被应用于评价海鲈、鲷、鲟等养殖鱼类的动物福利^[4,7,68]。

尽管胁迫应激对于养殖鱼类的健康是一个主要因素,但是疾病并不总是与恶劣的环境条件相

关联,不同的寄生虫、细菌、病毒或真菌疾病在水产养殖均能够降低水产养殖动物福利。为了有效地将水产养殖的风险降至最低,更重要的是减少易感病原体、寄生虫以及物理伤害的来源^[46]。水产养殖中预防是最理想的手段,这只能通过良好的管理、优化系统设计和提高养殖技术予以实现^[42,69]。

由于水产养殖动物福利广泛涉及到的水产动物在各种复杂参数下的生理、生化和行为等一系列变化,因此截止目前尚无一种可靠的方法能够准确评估水产养殖动物福利^[70-71]。但是随着养殖设施、养殖技术以及生物学研究的不断发展,在一个装备设施精良、环境条件稳定的条件下,深入阐释水产养殖动物福利将越来越成为可能^[43]。

4 提高我国循环水福利养殖的关键技术探讨

4.1 我国封闭循环水设施装备与技术的发展现状

目前中国是全球第一的水产养殖大国,但养殖理念和模式较为传统,陆基工厂化养鱼起步较晚,在循环水养殖领域特别是设施装备方面与国外先进国家还有很大的差距,存在的主要问题是:①装备的标准化与自动化程度低;②养殖水处理的高效生物技术有待提高;③循环水系统装备的集成、智能化与信息化控制技术亟需完善;④精准化养殖技术有待提高;⑤循环水福利养殖保障机制尚未建立;⑥新型清洁可再生能源的开发滞后。从设施装备的角度分析,循环水系统可以分为设施型和设备型两大类,国外循环水系统以成套设备型居多,国内以设施型为主,两者各具优势与特点。设施型和设备型两类系统,最大的区别在于设施型采用了气浮池与多级生物滤池等设施替代了蛋白分离器和生物滤器等设备,循环系统中设备相对较少,投资成本和运行成本较低,生物滤池耐冲击性较好,虽占地较设备型系统稍大,但比较适合中国的国情;设备型循环水系统成套设备多,电能耗量大,系统投资成本较高,技术要求高,特别是在目前国内养殖装备制造水平较低、故障率较高和养殖工人素质较低的现实情况下,在我国发展设备型系统还有较长的路要走。

4.2 水产福利养殖健康状况评价体系的构建

由于养殖鱼类的生理指标与人类完全不同,

又不像人类一样具备语言的表述能力,因此如何对其健康状况作出科学评价是水产福利养殖体系建立的关键技术问题。人类自身的健康水平可以通过语言的描述和定期体检的血液、血清、尿液等指标来判定,如心率、血压、血糖、血脂、尿酸等指标。超过健康的评定标准,就认为是处于亚健康状态或病患状态,需要调理或医治。对于水产动物的健康状况,也可以参照人类的健康评定机制通过开展大量系统的相关实验与研究进行深入地探讨,从诸如鱼类的皮质醇、肾上腺素、生长激素、性腺激素、血液中的红细胞数量、白细胞数量、血红蛋白含量和血清中的超氧化物歧化酶(SOD)、碱性磷酸酶、溶菌酶、转氨酶以及相关基因表达中筛选出与养殖鱼类健康密切相关的代表性指标,

在全面考量商品鱼的这些指标及其调控对人类食品安全和养殖成本的影响基础上,建立起我国水产养殖鱼类的健康状况评价体系,以此为标准对水产养殖过程中鱼类出现的某些指标超过设定值的情况,要及时通过人为调控与这些健康指标相关联的水环境等影响因子或纠正错误的养殖管理方法,尽可能使养殖对象回归于较佳的福利状态下生长,最终获得优质安全的水产品。因此可以说水产福利养殖健康状况评价体系的构建工作是实施水产福利养殖技术路线中最重要的环节。

4.3 基于福利养殖理念的封闭循环水工程化调控关键技术

目前我国工厂化循环水采用较普遍的工厂化循环水系统的基础工艺流程如图 1:

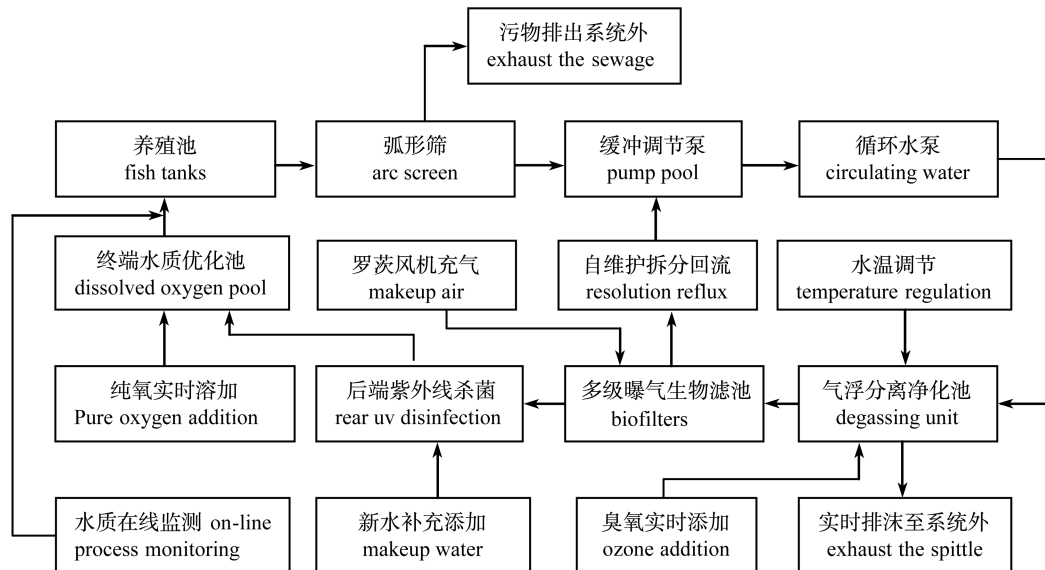


图 1 封闭式循环水养殖系统工艺流程图

Fig.1 Process chart of closed recirculation aquaculture system

从工程化技术角度看,封闭循环水系统的设施装备种类繁多,每一项设施装备都有不同的用途,集成与调控这些设备就可以大幅度的提高循环水系统水产养殖动物的福利水平。在循环水福利养殖影响因子的分析中可以看出,几乎所有设备的调控都与养殖水环境的改善有关。

物理过滤:用来养殖水固液实时分离的设备,通过提升微滤机设备滤网的过滤精度,可以将颗粒状有机污染物固液分离的比例提高;改进提升气浮机、蛋白分离器的效能,如设备产生的微气泡数量和大小,以及气泡上升空间等,可以将养殖水中的微小悬浮物、胶质粘液等更多的排除到循环

系统之外,减少后续生物滤环节的负荷;同时可以通过曝气,脱除水中二氧化碳等部分有害气体,对稳定养殖水的 pH 值均有积极的作用。

生物过滤:具有有效去除养殖水中氨氮、亚硝酸氮等对养殖动物有害污染物的功能。是循环水系统水处理的关键技术环节,直接影响养殖水质的净化效能。进一步研究改善生物滤器中的流态、滞留时间、滤料的材质形状和比表面积、高效生物细菌的筛选和培育与生物膜的快速构建等技术是当前工厂化循环水研究的重点内容之一。目前已有实验证明,通过循环水系统生物滤池气水比、循环次数等运行参数的优化,可以提高生物滤

池的净化效能;比如通过罗茨风机的变频技术或电动阀门的气量控制,来调控生物滤池的气水比;根据养殖池进水阀门和循环水泵的配合,寻求系统的最佳日循环次数,都可以有效降低养殖水体中的氨氮、亚氮、COD等的指标,相应提高了水产动物福利。

系统装备集成:根据养殖品种的生物学和行为学特性,通过对水质自动在线监测和视频监控系统的数据和图像资料以及相关生理指标的综合分析,并且将养殖鱼类健康指标与福利评价指标进行比较判断,对于造成健康指标偏差较大的影响因子,计算机可以通过智能管控系统实施多种设备的联动调控,改善水环境条件。比如对调温设备热量、冷量的调配,将系统养殖水温控制在养殖鱼类最佳福利状态中;还可以调控系统纯氧管路的电动阀门的开度,实时改善系统中水体的溶氧水平;通过循环水泵的变频调控技术,不仅可以节省水泵的电耗,还可以在养殖动物不同的养殖时期,通过养殖池电动进水阀门和水泵流量控制,可以使水流产生变速,甚至可以通过计算机控制模拟潮汐往复流的流态变化,使之接近自然海域的动态水环境条件,来刺激鱼类的繁殖与生长。通过调整养殖水中 ORP 指标,来控制系统臭氧添加量以此改善养殖水质和提高鱼的生长性能,这一点国外的科学家已通过实验得到证明^[72-74];通过酸碱制剂的计量控制,可以调整循环水系统养殖水的 pH 值;通过添加卤水或盐的计量控制,可以调整养殖水的盐度;通过声、光、电等调控,创造出适宜养殖动物生长的环境条件。根据养殖池进水口的细菌总数测定数据,特别是有害弧菌数量的变化,可以通过开启 UV 杀菌模块中 UV 灯管的数量用来保障养殖水的安全。除此之外,自动投饵系统看似不直接参与对水环境的调控,其实它是影响水环境的关键因素之一,因为科学的投饲策略通过计算机的控制可以实现精准投喂,减少甚至消除养殖水中的剩余残饵,使水中的污染物从源头上得到了有效控制,可以保证水环境更加稳定清新。

总之,通过鱼类福利养殖健康指标优化与评价标准制定,并以此为基础,利用先进制造技术、信息化技术、自动化控制技术、现代生物技术与精准养殖技术的交叉融合,实现循环水系统的所有设施装备实现智能化联动调控,完成海水循环水

福利养殖系统的构建,创造出最适宜水产鱼类生长的环境,结合工厂化精准养殖技术,以达到提高水产养殖福利的最终目标。

5 推行我国福利养殖的构想和展望

由专业的视角看,开创适合我国国情的工业化封闭循环水福利养殖模式,无论从工程化设施装备方面,还是从养殖管理、饲料与营养、病害防治等方面都具备了实施的条件和可行性,但要在水产养殖领域全面推进福利养殖还有很长的路要走和很多的关键技术问题要解决,为此提出如下设想。

5.1 加强基础理论的研究

根据养殖鱼类的生物学、生理学、生态学和行为学特性,全面掌握鱼类自然状态下的生活和生长规律,并拟合于工厂化循环水养殖系统中,创造性地开展水产养殖模式与水产福利、管控体系、设施装备标准化等方面的基础理论及应用研究,充分体现水产养殖福利全面性;创建循环水多种设备联动调控水环境条件的智能化技术,将水产养殖对象所产生的应激与胁迫反应降低到最小程度,最终使鱼类福利与精准养殖技术和设施装备高度融合为一体,以达到科学、合理、高效运转的目标。

5.2 建立相关的法律法规规范行业行为

随着对福利养殖的深化认识与技术装备水平的不断提高,应及时制定和颁布与福利养殖有关的标准和法规;加快与国际相关法律的接轨步伐,提高全民水产品质量安全意识,监督和限制养殖人违背职业道德的行为。

5.3 优化福利养殖的宏观大环境

规范养殖饲料市场和鱼药市场,通过提高养殖人员技术水平,规范养殖人员的上岗资格等措施,优化福利养殖的大环境。建立工业化养殖的物联网远程智能控制与信息化系统,通过专家远程养殖指导和病害快速诊断来提升与保障水产养殖鱼类的福利。

综上所述,从基于提高养殖鱼类的福利的理念出发,通过研究不同水产养殖鱼类的习性、生长规律以及在高端循环水系统中生态表现,来构建和优化水产养殖鱼类的全人工生存环境,去完美体现人与动物和大自然和谐共存的境界。相信不久的将来,我们的水产福利养殖完全可以通过工

业化的思路和工程化手段来实现这一远大目标。

参考文献:

- [1] 姜成钢,刁其玉,屠焰. 羊的福利养殖研究与应用进展[J]. 饲料广角,2008(5):37-40.
- [2] Broom D M. Indicators of poor welfare [J]. The British Veterinary Journal,1986,142(2):524-526.
- [3] Dawkins M S. From an animal point of view; motivation, fitness and animal welfare [J]. Behavioral and Brain Sciences,1990,13(1):1-61.
- [4] Brambel F W R. Report of the technical committee to enquire into the welfare of animals kept under intensive husbandry systems [R]. London: H. M. Stationery Office,1965;13.
- [5] Hungtingford F A. Current issues in fish welfare [J]. Journal of Fish Biology, 2006, 68 (2): 332-372.
- [6] Broom D M. Animal welfare defined in terms of attempts to cope with the environment [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Supplementum, 1996, 27 (suppl. 1): 22-28.
- [7] 吕青,卢晓中,杜琦,等. 水产养殖动物的福利及其维护和应用 [J]. 水产科技情报, 2009, 36 (3): 113-116.
- [8] Davidson J, Good C, Welsh C, et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems [J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44(3):80-96.
- [9] Roque d'Orbcastel E, Person-Le Ruyet J, Le Bayon N, et al. Comparative growth and welfare in rainbow trout reared in recirculating and flow through rearing systems [J]. Aquacultural Engineering, 2009, 40(2):79-86.
- [10] Davidson J, Good C, Welsh C, et al. Abnormal swimming behavior and increased deformities in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* cultured in low exchange water recirculating aquaculture systems [J]. Aquacultural Engineering, 2011, 45 (3): 109-117.
- [11] Good C, Davidson J, Welsh C, et al. The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems [J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44(3):97-102.
- [12] Pelis R M, McCormick S D. Fin development in stream- and hatchery-reared Atlantic salmon [J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4):525-536.
- [13] McKenzie D J, Höglund E, Dupont-Prinet A, et al. Effects of stocking density and sustained aerobic exercise on growth, energetics and welfare of rainbow trout [J]. Aquaculture, 2012, 338-341:216-222.
- [14] Reiser S, Wuertz S, Schroeder J P, et al. Risks of seawater ozonation in recirculation aquaculture-effects of oxidative stress on animal welfare of juvenile turbot (*Psetta maxima*, L.) [J]. Aquatic Toxicology, 2011, 105(3-4):508-517.
- [15] 邱清华, 向钊, 朱海生. 浅议现代猪的福利养殖 [J]. 河南畜牧兽医, 2013, 34(7):17-19.
- [16] 郭艳青, 许尚忠, 孙宝忠, 等. 欧盟犍牛福利养殖措施及其效果分析 [J]. 中国牛业科学, 2006, 32(5):90-92.
- [17] 胡景威, 李锋, 单安山. 实施家禽福利养殖的必要性及措施 [J]. 饲料工业, 2009, 30(3):50-53.
- [18] 顾宪红. 动物福利和畜禽健康养殖概述 [J]. 家畜生态学报, 2011, 32(6):1-5.
- [19] 林建斌. 水产养殖与水产动物福利浅析 [J]. 中国水产, 2012(9):31-33.
- [20] 颀飞, 哈利, 何虎成. 关于动物福利养殖的思考 [J]. 畜牧兽医科技信息, 2009(1):5-6.
- [21] 雷霖霖. 中国海水养殖大产业架构的战略思考 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(3):600-609.
- [22] 刘鹰, 刘宝良. 我国海水工业化养殖面临的机遇和挑战 [J]. 渔业现代化, 2012, 39(6):1-4.
- [23] 黄滨, 高淳仁, 关长涛, 等. 论节能型工厂化循环水养殖的精准化 [J]. 渔业现代化, 2011, 38(1):15-18.
- [24] Broom D M. Animal welfare: concepts and measurement [J]. Journal of Animal Science, 1991, 69(10):4167-4175.
- [25] Broom D M. Assessing welfare and suffering [J]. Behavioural Processes, 1991, 25(2-3):117-123.
- [26] Mendl M, Paul E S. Consciousness, emotion and animal welfare; insights from cognitive science [J]. Animal Welfare, 2004, 13(suppl. 1):S17-S25.
- [27] The Farm Animal Welfare Council [R]. Report on the Welfare of Farmed Fish. Surrey; 1996.
- [28] Schreck C B. Immunomodulation; endogenous factors [M]. Sheffield: Academic Press, 1996:311-337.
- [29] Barton B A. Stress in fishes; a diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids [J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(3):517-525.
- [30] Pickering A D. Stress and Fish [M]. London: Academic Press, 1981.
- [31] Randall D J, Perry S F. Catecholamines [M] //

- Randall D J, Farrell A P, Hoar W S, Eds. Fish Physiology. New York: Academic Press, 1992: 255 – 300.
- [32] Reid S G, Bernier N J, Perry S F. The adrenergic stress response in fish; control of catecholamine storage and release [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Pharmacology Toxicology and Endocrinology, 1998, 120(1): 1 – 27.
- [33] Donaldson E M. The pituitary-interrenal axis as an indicator of stress in fish [M] // Pickering AD Eds. Stress and fish. New York: Academic Press, 1981: 11 – 47.
- [34] Mommsen T P, Vijayan M M, Moon T W. Cortisol in teleosts: dynamics, mechanisms of action, and metabolic regulation [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1999, 9(3): 211 – 268.
- [35] Schreck C B. Stress and compensation in teleostean fishes: Response to social and physical factor [M] // Pickering AD Eds. Stress and Fish. New York: Academic Press, 1981: 295 – 314.
- [36] Wendelaar Bonga S E. The stress response in fish [J]. Physiological Review, 1997, 77(3): 591 – 625.
- [37] Iwama G K, Pickering A D, Sumpter J P, et al. Fish Stress and Health in Aquaculture [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [38] Iwama G K, Thomas P T, Forsyth R B, et al. Heat shock protein expression in fish [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1998, 8(1): 35 – 36.
- [39] Wedemeyer G A, McLeay D J. Methods for Determining the Tolerance of Fishes to Environmental Stressors [M] // Pickering A D Eds. Stress and fish. New York: Academic Press, 1981: 247 – 275.
- [40] Wedemeyer G A, Barton B A, McLeay D J. Stress and acclimation [M] // Schreck C B, Moyle P B, Eds. Methods for fish biology. Bethesda (MD): American Fisheries Society, 1990: 451 – 489.
- [41] FSBI (Fisheries Society of the British Isles). Fish Welfare [R]. Granta Information systems: Cambridge U K, 2002.
- [42] Conte F S. Stress and the welfare of cultured fish [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2004, 86(3 – 4): 205 – 223.
- [43] Ashley P J. Fish welfare: Current issues in aquaculture [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2007, 104(3 – 4): 199 – 235.
- [44] 王文博, 李爱华. 环境胁迫对鱼类免疫系统影响的研究概况 [J]. 水产学报, 2002, 26(4): 368 – 374.
- [45] Demers N E, Bayne C J. The immediate effects of stress on hormones and plasma lysozyme in rainbow trout [J]. Developmental & Comparative Immunology, 1997, 21(4): 363 – 373.
- [46] Stave J W, Roberson B S. Hydrocortisone suppresses the chemiluminescent response of striped bass phagocytes [J]. Developmental & Comparative Immunology, 1985, 9(1): 77 – 84.
- [47] Barton B A, Peter R E, Paulencu C R. Plasma cortisol levels of fingerling rainbow trout (*Salmo gairdneri*) at rest and subjected to handling, confinement, transport and stocking [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37(5): 805 – 811.
- [48] Pickering A D, Pottinger T G, Christie P. Recovery of the brown trout, *Salmo trutta* L., from acute handling stress: a time course study [J]. Journal of Fish Biology, 1982, 20(2): 229 – 244.
- [49] Bandeen J, Leatherland J F. Transportation and handling stress of white suckers raised in cages [J]. Aquaculture International, 1997, 5(5): 385 – 396.
- [50] Geslin M, Auperin B. Relationship between changes in mRNAs of the genes encoding steroidogenic acute regulatory protein and P450 cholesterol side chain cleavage in head kidney and plasma levels of cortisol in response to different kinds of acute stress in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. General and Comparative Endocrinology, 2004, 135(1): 70 – 80.
- [51] Rotlland J, Ruane N M, Caballero M J, et al. Response to confinement in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) is characterised by an increased biosynthetic capacity of interrenal tissue with no effect on ACTH sensitivity [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2003, 136(3): 613 – 620.
- [52] Doyon C, Gilmour K M, Trudeau V L, et al. Corticotropin-releasing factor and neuropeptide Y mRNA levels are elevated in the preoptic area of socially subordinate rainbow trout [J]. General and Comparative Endocrinology, 2003, 133(2): 260 – 271.
- [53] Pickering A D, Stewart A. Acclimation of the interrenal tissue of the brown trout, *Salmo trutta* L., to chronic crowding stress [J]. Journal of Fish Biology, 1984, 24(6): 731 – 740.
- [54] Strange R J, Schreck C B, Ewing R D. Cortisol concentrations in confined juvenile chinook salmon

- (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1978, 107(6): 812 - 819.
- [55] Mormède P, Andanson S, Aupérin B, et al. Exploration of the hypothalamic-pituitary-adrenal function as a tool to evaluate animal welfare [J]. Physiology & Behavior, 2007, 92(3): 317 - 339.
- [56] 钱云霞, 陈惠群, 孙江飞. 饥饿对养殖鲈鱼血液生理生化指标的影响 [J]. 中国水产科学, 2002, 9(2): 133 - 137.
- [57] 陈晓耘. 饥饿对南方鲶幼鱼血液的影响 [J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2000, 22(2): 167 - 169.
- [58] 黄辨非, 童响波, 罗静波. 饥饿对泥鳅某些血液指标的影响 [J]. 淡水渔业, 2006, 36(6): 33 - 35.
- [59] 陈惠群, 杨文鸽. 饥饿对鳊鲃某些血液指标的影响 [J]. 水产科学, 2001, 20(2): 10 - 11.
- [60] 杨成辉, 蔡勋, 刘霞, 等. 饥饿和再投喂对哲罗鱼幼鱼血液生理生化指标的影响 [J]. 淡水渔业, 2009, 39(1): 36 - 40.
- [61] 张桂蓉, 严安生, 高玉芹. 饥饿对异育银鲫几项血液指标的影响 [J]. 水利渔业, 2003, 23(1): 9 - 10.
- [62] 胡一中, 程宏毅, 王鸿艳. 饥饿对月鳢几项血液指标的影响 [J]. 生物学杂志, 2009, 26(1): 81 - 83.
- [63] 沈文英, 张利红, 郑永萍, 等. 饥饿对银鲫血液组分和卵巢发育的影响 [J]. 动物学研究, 2003, 24(6): 441 - 444.
- [64] 胡麟, 吴天星. 饥饿对鱼类生理生化的影响 [J]. 水利渔业, 2007, 27(1): 7 - 9.
- [65] 陈剑杰, 曹谨玲, 罗永巨. 饥饿对胡子鲇血液生理生化指标的影响 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(5): 2014 - 2015.
- [66] 许源剑, 孙敏. 环境胁迫对鱼类血液影响的研究进展 [J]. 水产科技, 2010, 3: 28 - 31.
- [67] Arends R J, Mancera J M, Munoz J L, et al. The stress response of the gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) to air exposure and confinement [J]. Journal of Endocrinology, 1999, 163(1): 149 - 157.
- [68] Acerete L, Balasch J C, Espinosa E, et al. Physiological responses in Eurasian perch (*Perca fluviatilis* L.) subjected to stress by transport and handling [J]. Aquaculture, 2004, 237(1 - 4): 167 - 178.
- [69] Gornati R, Papis E, Rimoldi S, et al. Rearing density influences the expression of stress-related genes in sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) [J]. Gene, 2004, 341(27): 111 - 118.
- [70] Ribas L, Planas J V, Barton B, et al. A differentially expressed enolase gene isolated from the gilthead sea bream (*Sparus aurata*) under high-density conditions is up-regulated in brain after *in vivo* lipopolysaccharide challenge [J]. Aquaculture, 2004, 241(1 - 4): 195 - 206.
- [71] Salas-Leiton E, Anguis V, Martín-Antonio B, et al. Effects of stocking density and feed ration on growth and gene expression in the Senegalese sole (*Solea senegalensis*): Potential effects on the immune response [J]. Fish and Shellfish Immunology, 2010, 28(2): 296 - 302.
- [72] Rottmann R W, Francis-Floyd R, Durborow R. The role of stress in fish disease [R]. Southern Regional Agricultural Center and the Texas Aquaculture Extension Service, 1992.
- [73] Broom D M. Welfare evaluation [J]. Applied Animal Behaviour Science, 1997, 54(1): 21 - 23.
- [74] Dawkins M S. Evolution and animal welfare [J]. The Quarterly Review of Biology, 1998, 73(3): 305 - 328.

The research on key technology and intelligent equipment of aquaculture welfare in industrial circulating water mode

HUANG Bin¹, LIU Bin¹, LIE Jilin^{1*}, ZHAI Jieming², YAN Kuoqiu³, LIANG You¹

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Laizhou Mingbo Aquatic Co. Ltd., Laizhou 264000, China;

3. Goldbill (Fujian) Aquaculture Technology Co., Ltd., Ningde 352100, China)

Abstract: The establishment of aquaculture welfare in circulating water system, based on fishery welfare concept and the characteristics of closed circulating water system of aquaculture, has become a strategic need to promote the sustainable development of modern fishery in China. In this paper, the impact factors of welfare in circulating water system, intensive demands and scientific evaluation standards of aquaculture welfare in circulating water system were analyzed and discussed. The contents of this paper refer to the key technology in circulating water system, cross merging advanced information technology and automatic control technology. The purpose of this paper is to provide theoretical and technical support to set up the criterion of production process control, establish security mechanism in aquaculture welfare, and truly improve quality and safety level of aquacultural product in the future.

Key words: welfare culture; industrialization; circulating water; intelligent; equipment; key technology

Corresponding author: LEI Jilin. E-mail: leijl@ysfri.ac.cn