

对虾养殖水处理管理理念与策略的思考

于道德¹, 宋静静¹, 刘凯凯¹, 叶海斌², 王晓璐², 王友红², 刘洪军²

(1. 山东省海洋科学研究院 山东省海水健康养殖技术工程技术研究中心, 山东 青岛 266104; 2. 山东省海洋科学研究院 山东省海水养殖病害防治重点实验室, 山东 青岛 266104)

摘要: 针对对虾养殖过程水处理的研究现状和瓶颈问题, 文章综述了国际和国内重要的水处理管理理念与策略, 主要包括: 养殖用水“减法”管理理念、投入品“减法”管理理念、基于微生物的水处理策略和基于不同营养级的生物水处理策略等。较全面地探讨了养殖节水、生态调水、精准投喂、补偿生长、生物饵料、生物过滤器、水动力等对于水处理的重要性。并建议建立基于对虾福利生物学的水处理评价体系, 联合生物行为变化、生态生理指标、水体理化指标进行综合评价。该综述期望为对虾产业和水产养殖的可持续发展提供新思路 and 可行路径。

关键词: 对虾; 水处理; 补偿生长; 福利生物学; 管理理念与策略

中图分类号: S968.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2021)11-0156-09

DOI: 10.11759/hyqx20200810001

21 世纪人类面临诸多困境, 包括人口增长、气候变化、环境污染、地球关键生态系统退化、生物多样性与生态系统功能和服务价值持续降低、海洋渔业资源持续衰退、河流生物多样性降低和淡水危机等^[1]。水产养殖暂时缓和了人们对海洋蛋白的需求与渔业资源持续衰退之间的矛盾。然而, 以牺牲环境为代价的水产养殖业带来短暂效益的同时, 其根源性的弊端, 如临近水域环境退化、疫病频发等也成为阻碍水产养殖业可持续发展的瓶颈^[2]。养殖水产品作为陆源蛋白替代品是否有助于水资源保护的科学问题仍存在争议^[3]。因此, 针对水产养殖业可持续发展的理念、方法、设施大量涌现, 基于水产设施的循环水养殖系统(recirculating aquaculture systems, RAS)、基于生态方法的多营养层次综合养殖(integrated multi-trophic aquaculture, IMTA)系统、环境友好型的水产养殖系统(environmentally friendly approach)^[4]和养殖尾水零排放系统(zero-discharge system, ZDS)^[5]等概念和模式也在不断丰富和扩展中。水处理问题作为其中极其重要的环节, 决定了其养殖模式是否可持续发展。

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)和斑节对虾(*Penaeus monodon*)作为主要养殖品种, 在全球许多沿海国家和地区的经济发展中扮演着重要角色, 例如中国、泰国、孟加拉国、厄瓜多尔等^[6]。然而, 目前对虾生产模式带来高额经济回报的同时, 亦对环

境产生了灾难性的影响^[7]。池塘养殖作为当前主要的对虾养殖模式, 其对水的需求量很大。水作为水产养殖业的主要载体涉及自身污染、食品安全、环境污染、疾病与人类健康、耐药性的水平传递等诸多方面, 这成为未来制约对虾产业发展的主要因素之一。

国内外已有大量关于对虾水产养殖用水的研究, 包括基于工艺流程工厂化循环水模式^[8]、基于生态系统方法的综合养殖模式(池塘模式)、针对单一养殖品种——凡纳滨对虾室内养殖水处理和调控^[9]以及鱼类养殖过程循环水处理过程和工艺等, 这些对于对虾产业发展都是值得借鉴和参考的。中国的与东南亚、非洲、拉美等国家的对虾养殖在气候、区域等自然条件方面存在巨大的差异性, 加之不同对虾品种或者品系在生理生态、养殖方式、个体行为等方

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系对虾蟹类创新团队项目(创新团队 SDAIT-13-1); 山东省 2018 年度农业重大应用技术创新项目(南非斑节对虾绿色健康养殖模式研究与示范)

[Foundation: Shrimp and Crab Innovation Team of Shandong Modern Agricultural Industrial Technology System, No. SDAIT-13-1; Key Agricultural Application Technology Innovation Project of Shandong Province in 2018(Research and Demonstration of Green and Healthy Culture Mode of *Penaeus monodon*)]

作者简介: 于道德(1978—), 男, 汉族, 山东省青岛人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋生物繁育研究, 电话: 0532-82686340, E-mail: wensentte@163.com; 刘洪军(1964—), 通信作者, 男, 汉族, 山东省青岛人, 研究员, 硕士, 主要从事水产增养殖、渔业资源修复研究, 电话: 0532-82681569, E-mail: hongjunl@126.com

面的种间差异性,意味着在水处理方面中国借鉴国外成功经验的同时,更需构建适于本国的对虾养殖水处理理念与模式。

1 养殖用水的“减法”管理理念

与传统农业相比,水产养殖的直接水足迹(water footprint)用水量极大。例如,池塘养殖方式按收获生物量计算用水量为 $45 \text{ m}^3/\text{kg}^{[10]}$,而传统养殖斑节对虾的平均耗水量仅为 $20 \text{ m}^3/\text{kg}^{[11]}$ 。就投入品而言,配合饵料在生产时已消耗大量水资源(虚拟水, virtual water),其作为水产养殖的间接水足迹不容忽视。因此,改善喂养策略和保持良好水质需在优化生产、饵料替代和减少浪费等方面同步进行^[12]。

对虾养殖换水的目的是保持水质,促进虾体生长,避免氨、氮等浓度过高影响对虾早期的蜕皮过程^[13]。然而,换水意味着潜在营养物质(有机物)的大量浪费,故精确定养殖需水量至关重要。因此,规模化的水产养殖企业制定并执行最佳水管理实践(best water management practice, BWMP)的规程十分必要,制定科学计划用水、有效换水及其替代方案等(如赤潮、浒苔灾害等不可抗力及突发事件)。以池塘养殖为例,综合当地农业气候条件、水土流失状态、池塘渗漏率、蒸发等因素,结合养殖的品种、规格、密度、生长周期、生物量、池塘内浮游生物群落状态及水体的营养状态来正确评估养殖最佳用水量。

在养殖过程中,也要根据对虾的生长状态、密度、摄食情况等,对补充/交换的必要性以及用水量进行评估。仅凭技术人员经验进行换水不仅增加成本,还会增加养殖系统的不稳定性(外界海水病毒的引入等)^[14]。Boyd 指出,水交换通常对水质没有太大裨益^[15],所以到底需不需要换水是值得思考的问题。

1.1 精准投喂与配方优化策略

目前的生产方式表明,水产养殖并不是一个节水的替代畜牧业的粮食生产方式。对虾饲料配方中的陆源成分,如大豆、玉米等农作物在生产过程中本身就消耗大量水,在替代鱼粉鱼油的过程中增加了水足迹,所以水产养殖对淡水资源的压力亦会越来越^[16]。根据池塘水体状态、对虾自身状态,首先要减少不必要的投喂,建立属于每个养殖群体的特定饵料精准投喂策略。据统计,水产养殖中饵料的浪费比例高达 30%,饲料中的氮只有 25%在虾收获时被回收,而约 75%被释放到水体中^[17],这是富营养化

养殖尾水中氮、磷等主要有机污染物的来源^[18]。且对虾在低溶氧条件(4 mg/L)下,摄食饵料多未消化而形成假粪排入水体,恶化水质^[19]。因此,提高对虾不同品种、不同生长阶段的饵料利用效率将是未来对虾可持续养殖的重要一环。除了在饵料配方上需进一步优化外,还需明晰对虾消化系统与植物蛋白饲料源之间的相互作用,通过调节对虾肠道和水体中的微生物群,提高对虾对于营养物质的利用率。这相当于养殖过程中通过减少投入品而达到的减排措施,不仅减少了水的消耗,也减少了池塘养殖的潜在污染^[20],这样的双重功效是我们养殖实践中最容易忽视的环节。

1.2 补偿生长(compensatory growth, CG)策略

补偿生长是机体进行自我营养调控的一个生长现象,是动物在经受长期营养限制后以较高速度生长以获得补偿性提高的现象^[21]。除陆生畜禽动物外,大量水产动物都存在补偿生长现象^[22],包括鱼类^[23]和对虾等甲壳类^[24]。虽然对于 CG 进化结果、生理和分子机制等还不是很清楚,但这不影响人们在对虾养殖实践中利用这种特性来节约水资源、减少污染^[25]。大量生产性的实验已证实,在不同对虾品种应用 CG,如斑节对虾^[26]、中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)^[27]和短沟对虾(*P. semisulcatus*)^[28]均取得了良好效果,在凡纳滨对虾中,甚至可节约 25%的饵料,大大降低养殖池塘的换水量^[29]。另外,肠道内含物分析显示:在限制摄食的情况下,斑节对虾的肠道包含碎屑物质、轮虫、桡足类、硅藻和绿藻,这些均有助于虾的生长^[19, 26, 30]。因此,在池塘养殖条件下更需时刻注意 CG 原理的应用。未来应重点根据养殖对虾的品种、发育时期以及养殖模式等,综合计算 CG 阈值,并在阈值范围内进行 CG 原理的应用。在虾蟹类蜕皮等与生长密切相关的发育事件等关键点,建立 CG 策略尤为重要。

1.3 生物饵料养殖模式

海水端足目钩虾亚目种类是甲壳动物中最大的类群之一,具有个体小、种类多、繁殖快、分布广的特点,是很多底栖鱼虾类和游泳动物的优质饵料。海水池塘端足类的重要优势种——中华原钩虾(*Eogammarus sinensis*)在作为养殖对虾的动物性活饵方面已经受到广泛关注^[31-32]。另外,东营河口地区

已有利用池塘养殖青苔(丝状海藻)和螺赢蜚(*Corophium acherusicum*)作为虾苗前期生物饵料的生态化模式,对虾长至 6~8 cm 不投饵^[33],管理方便,不需要换水,是一种非常适合中国盐碱地区的对虾池塘养殖模式,通过进一步优化量化该模式中定植培育的生物饵料物种组成与配比,可以做到对虾养殖全程不换水、不投饵或少换水、少投饵。

如何利用好池塘等天然水体的自我发育、演替等生态过程来为对虾的水产养殖服务,如何让水产养殖在更加符合生态理念条件下可持续发展,是人们必须优先考虑的问题^[34]。伴随着短时节性群落演替、生物多样性变化、能量及食物网构成等研究的逐步深入,零饵料添加的对虾生态养殖模式必定会愈加完善。该生态养殖模式具备环境友好、经济实用等特点,同时对于水产品品质提升、食品安全升级亦具有重要的借鉴作用。

2 基于微生物的水处理系统

养殖水处理的管理理念与养殖模式的发展是相辅相成的,生物絮凝技术(biofloc technology, BFT)最早是为了解决对虾循环水养殖模式中水质问题而发展起来的,这与 ZDS 在理念上是一致的^[35-36],也称作零交换需氧异养系统(zero-exchange aerobic heterotrophic system, ZEAH),目前已在对虾循环水养殖中广泛应用^[37]。BFT 的技术核心包括添加有机碳源、调节水体的碳氮比,并通过不断曝气和搅拌,将氨氮等有害氮素转化成菌体蛋白,形成可被滤食性的生物絮团^[38]。其优势在于减少水的消耗和饵料量、营养物质循环利用、减少病原体的引入而提高生物安全^[38]。该技术应用到杂食性罗非鱼和对虾的养殖过程中,可节约 10%~20%的饲料^[39-40],降低养殖对象对鱼粉和鱼油的营养依赖^[41]。以 BFT 为核心的人工基质和生物膜技术亦具有良好的开发前景^[42]。

益生菌(probiotics),即友好的细菌(friendly bacteria),源于对宿主的有利作用,主要作用于肠道菌群的稳定。Kozasa 最早在鲷鱼(*Seriola quinqueradiata*)养殖上使用益生菌,随后 Kewcharoen 等记录了芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)具有提高凡纳滨对虾生长率、免疫力,同时改善水质的能力^[43]。源于益生菌在水产动物疾病控制中的巨大潜力,其商业化的速度要快很多。1998 年,商业化的益生菌(芽孢杆菌)产品开始应用于对虾的池塘养殖。源于益生菌的益生元

(益生元)及共生素(合生元)等微生物及天然小分子物质,亦可调节目标物种的肠道微生物菌群群落健康^[44]。目前,此类微生物制剂的作用主要体现在促进养殖物种肠道菌群稳定、提高抗病能力和促消化等方面,亦可通过抑制有病菌繁殖起到一定的改善水质的作用。极少的微生物制剂也可直接调节水质情况,如芽孢杆菌,可降低水体氨氮浓度、维持海水酸碱度稳定^[45]。

然而,该领域可应用的生产操作规范尚不完善,会出现无选择或过量添加益生菌的情况,对环境造成一定的负面影响^[46]。涉及对虾品种、发育时期、水环境、微生态制剂的组合、剂量和持续时间等变量以及关联性研究仍需要进一步细化。生物絮凝和益生菌添加技术都是利用微生物作用来进行水质调节、营养增效,BFT 依赖于碳源的类型,开发更为经济的碳源(工农业的废弃物)以及不同碳源对于水体各指标的贡献值的量化是未来主要方向之一,这决定着后期发育中的微生物组成和主要群落功能^[47]。值得注意的是,近 99%的微生物是不能培养的,人们对于微生物组成以及其生态功能的认知尚处于初级阶段。无论是 BFT 中自然生长的,还是添加益生菌形成的所谓有益微生物群落在对虾养殖水体中都具有不稳定、未知性、特异性的特性。故微生物群落间相互作用和养殖系统生态学是对虾养殖中微生物群落的成功管理基础,也是未来重点研究的方向^[48]。

不同于生物絮凝和益生菌的原位水处理技术,利用脱氮硫杆菌及其他微生物的生物脱氮技术等,属于循环水尾水无害化处理的范围,而且都是尾水异位后处理模式。世界上目前利用循环水进行水产养殖的比例不过 5%,且具有技术和成本上的局限性,其中硝化细菌和反硝化细菌在生物脱氮的过程中,都容易产生一氧化二氮(N_2O),温室效应的强度是二氧化碳(CO_2)的 265 倍多,且寿命达 100 年之久,在我们没有完全清楚该气体产生的机制,并能完全控制该过程的前提下,大量使用这样的水处理技术具有很大的风险^[49],故我们不做该方向的论述。

3 基于多营养层次综合养殖的水处理系统

在中国海水养殖的实践中,多营养层次综合养殖(IMTA)系统主要源于中国学者针对桑沟湾开展的一系列工作^[50-53]。本质上,IMTA 是模拟可见的自然

生态系统组成,根据不同营养级的物种混合养殖,在系统内部通过生物修复(bioremediation)过程完善水处理过程,从水体中去除氮和磷以减轻富营养化水平,同时改善水质和处理沉积物,降低有机物水平,从而降低生物风险,可以使水产养殖成为一种长期可持续的养殖方法。最早的 IMTA 应该就是中国的稻田养鱼(也属于水耕系统, aquaponics)。IMTA 一般以鱼类作为最高营养级^[54],在对虾池塘养殖中则以目标虾为最高营养级。

其中,具有吸收作用或者滤食性的藻类和贝类等统称为生物过滤器(biofilter),大型藻类主要作为无机吸收物种(inorganic extracting species)发挥净水作用^[55-56],能够有效去除溶解氮(dissolved integrated nitrogen, DIN, 包括 NH_4 、 NO_3 、 NO_2)和无机磷(PO_4)、已应用的藻类包括石莼(*Ulva lactuca*)^[57]、海带(*Saccharina japonica*)^[58]。目前,基于其吸收特性的大型海藻已经成功应用于中国的牧场建设,并发挥着重要的生态功能^[59]。其他具有滤食特性的物种还包括海绵类^[60]、贝类^[61]、多毛类等^[62]。其中贝类滤食有机颗粒物会排放 NH_4 ^[63];牡蛎的室内实验显示,在虾养殖尾水氮和磷含量分别降低了 72%和 86%的同时增加了 PO_4 的含量^[64]。海绵类对水体具有高效处理能力^[60, 65],同时还有很高的药用价值,却存在生物量低的缺点^[66],海绵类自身与各类微生物群落联系紧密,其次也是丰富生物活性次级代谢物的来源^[67],推测其在水处理上功能与 BFT 类似或更为稳定、高效。所以考虑如何在对虾养殖的水处理上突破该瓶颈,应该是未来重点研究的水处理技术之一。同样可以考虑其他具有类似潜在水处理能力的物种的挖掘、培养、定殖。

早在 1991 年,中国学者就提出了关于对虾池塘的 IMTA 养殖的理念^[68],经过 30 年的发展,目前对虾池塘养殖中却很少有应用 IMTA 的案例,这可能源于实际操作中的困难、不同商品的市场需求、成本控制和经济效益。理论研究与生产实践之间还有很长的路要走,可持续发展限制因素包括可持续的成本问题,以及分析综合水产养殖措施在改善环境、经济和社会可接受性方面的作用^[55]。例如,关于尺度和量化研究表明:桑沟湾属于大型开放海湾,其养殖容量和耐受力等都是池塘无法比拟的。不同地区的地理物候、物种分布、海水理化、生态弱点、池塘大小、操作流程等情况的差异都会导致养殖结果的巨大差异,这就需要真正了解和懂得不同模式

IMTA 的生态学原理,在养殖前一定要做好分析工作、进行定量化和预测化研究。

4 基于水动力学的水处理系统

从水动力学的角度来看,污染物的输移过程滞留时间与污染物排放量一样,对水体富营养化状况起着至关重要的作用^[69]。在富营养化达到一定程度后,水体交换率低的水域更容易发生藻华^[70]。可见水动力条件对于富营养化程度具有很强的放大效应。对虾池塘面积有限,养殖水体水量较小,更容易受到水动力条件的影响。因此在养殖过程中,必须考虑包括池塘的形状、大小、水深、充气方式^[71]等跟水动力条件密切相关的因素,使得水流向着减轻池塘富营养化程度、提高溶解氧含量等有利于对虾福利的方向发展。例如,在封闭池塘内的水体处于不流动状态,而充气方式加剧了沉积物的反复扰动,更容易形成藻华或利于病原微生物繁殖的条件。

在凡纳滨对虾养殖中,通过相互连接的池塘设计,提高了水体交换率,促进了池塘内的养分循环,减少了固体、颗粒状有机物和氮化合物对水环境的干扰,是基于水动力学的生态高效水循环模式^[72],可以在具有类似水体条件的区域推广。同理,我们也可以根据该循环模式对池塘进行改造,设计成不同池塘模块具有不同功能分区(对虾主养模块+水处理模块+鱼类主养模块+藻类贝类净化模块等),这种设计具有很大潜力成为一种更有效的联合池塘养殖方式。

Crab 指出,池塘养殖过程中的充气方式和位置仍然是生物絮凝技术未来发展中值得关注的问题^[47],未来基于水动力的节水调水生产模式会是一个值得研究的热点,其涉及相关固体、溶解性的有机物的迁徙规律以及微生物群落动力学(包括益生菌)、以及生物絮团等多方面偶联机制和协调效益。

5 基于对虾福利生物学(welfare biology)的评价体系

在具体的养殖实践中,我们进行水处理需要建立合适的评价体系,合适的、可量化的参数对评估风险至关重要。可惜的是,我们关注的更多是氨氮等水体理化指标,很少考虑到动物福利,也就是养殖动物是处于合适生长和繁殖的水体环境,是否表达自然的固有行为,还是受到应激胁迫表现超出自身能力的行为?这需要对养殖物种对虾开展行为学研究,对比野生状态和养殖状态下的行为差异,在

了解其行为变化与生态生理指标之间关联的基础上^[73],联合水体理化指标进行综合评价,而不是根据主观盲目地进行换水或者调水等错误方式,导致高成本、不必要的经济损失,并对动物福利带来不利影响。此外,对虾长期处于不适宜的水体环境,形成持续胁迫状态,从而导致生长受阻、品质降低(蛋白的质量)等问题也必将成为未来关注的热点之一,在此方面鱼类作为养殖水产动物和包括人类在内的脊椎动物的代表,已经表明了压力胁迫与生长、繁殖及品质的负相关^[74-75]。

在未来对虾养殖实践中,必须建立简单易行的福利指标。正如鱼类养殖未来的趋势一样^[74-75],对虾养殖日常管理中应当选择易观察到的形态变化和行为线索作为监测指标,而非通过实验室测试等费时费力的详细检查。需将养殖物种对虾的福利与健康、生长和疾病等建立更好的联系,做到防病于未然,不仅可以有效降低换水率、提高动物福利、提高经济和生态效益,也是可持续对虾产业的必经之路(图 1)。

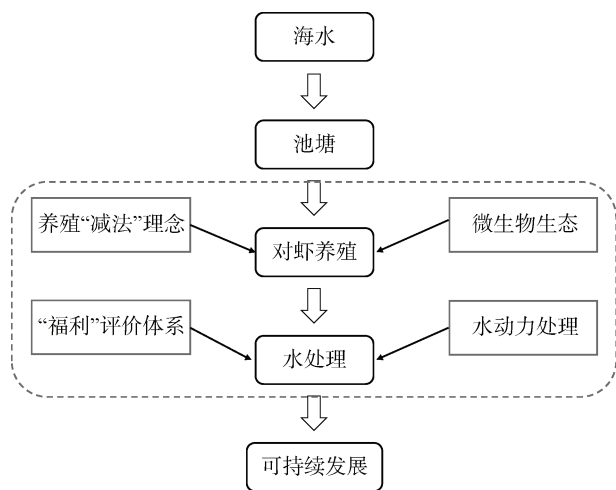


图 1 对虾养殖水处理管理路径

Fig. 1 Management path of water treatment for shrimp culture

此外,在水产养殖中,无论哪个品种进行高密度养殖无一例外都会降低动物的福利水平,导致长期慢性的压力。鱼类在此方面的研究已经展开,对虾福利存在同样的问题,不容忽视,这也为今后水产养殖发展提出了需要规避的错误方向,值得深入探究。

6 展望

除了针对养殖对象对虾福利的评价体系外,基

于养殖水质的精准实时监控以及相应模型构建,从而进行水质评价以及预测预警也将是未来发展的热点之一,例如以对虾养殖水质主要参数溶解氧为例,基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络,建立溶解氧预测模型,可提高水产养殖水质参数的预测速度及精度,为发展最佳水管理实践提供信息化手段^[76-77]。

随着对虾育种技术、养殖技术、养殖水处理技术以及水质预测能力的提升和完善,结合不同的养殖实际,耦合各种调控模式、生物类群或功能群等。在综合考虑成本控制、养殖系统稳定性、环境影响、食品或生物安全和产业发展可持续等多方面因素外,更为重要的是对于核心理念的把握,认清水质变化的本质和趋势,这样,才会有对虾养殖业及水产养殖业可持续发展的未来。

参考文献:

- [1] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P, GESSNER M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467(7315): 555-561.
- [2] NAYLOR R L, GOLDBURG R J, PRIMAVERA J H, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies[J]. Nature, 2000, 405(6790): 1017-1024.
- [3] 袁琪. 中国养殖鱼类水足迹估算及可持续养殖政策优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
YUAN Qi. Study on estimation of water footprint of farmed fish and optimization of sustainable aquaculture policy in China[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] 刘长发, 綦志仁, 何洁, 等. 环境友好的水产养殖业——零污水排放循环水产养殖系统[J]. 大连水产学院学报, 2002(3): 220-226.
LIU Changfa, QI Zhiren, HE Jie, et al. Environmental friendly aquaculture——Zero discharge integrated recirculating aquaculture systems[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2002(3): 220-226.
- [5] 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): 42-48.
- [6] HOSSAIN M A R, HASAN M R. An assessment of impacts from shrimp aquaculture in Bangladesh and prospects for improvement[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017: 1-97.
- [7] PÁEZ-OSUNA F. The environmental impact of shrimp aquaculture: a global perspective[J]. Environmental Pol-

- lution, 2001, 112(2): 229-231.
- [8] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 16-23, 32.
WANG Feng, LEI Jilin, GAO Chunren, et al. Research progress of water conditioning in industry recirculating aquaculture mode at home and abroad[J]. Engineering Science, 2013, 15(10): 16-23, 32.
- [9] 臧维玲, 戴习林, 徐嘉波, 等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报, 2008, 5: 749-757.
ZANG Weiling, DAI Xilin, XU Jiabo, et al. The technique and mode of regulating-controlling circulation water for indoor industrial culture of *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 5: 749-757.
- [10] VERDEGEM M C J, BOSMA R H, VERRETH J A J. Reducing water use for animal production through aquaculture[J]. International Journal of Water Resources Development, 2006, 22(1): 101-113.
- [11] WANG J K. Conceptual design of a microalgae-based recirculating oyster and shrimp system[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 28(1): 37-46.
- [12] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 35-48.
- [13] CHEN J C. Effects of ammonia on growth and molting of *Penaeus monodon* juveniles[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology - Comp Biochem Physiol C Comp Pharmacol, 1992, 101: 449-452.
- [14] MOHANTY R K, MISHRA A, PATIL D U. Water budgeting in black tiger shrimp *Penaeus monodon* culture using different water and feed management systems[J]. Turkish Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2014, 45: 428-432.
- [15] BOYD C, GROSS A. Water use and conservation for inland aquaculture ponds[J]. Fisheries Management and Ecology, 2000, 7: 55-63.
- [16] PAHLOW M, VAN OEL P R, MEKONNEN M M, et al. Increasing pressure on freshwater resources due to terrestrial feed ingredients for aquaculture production[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 847-857.
- [17] CRAB R, AVNIMELECH Y, DEFOIRDT T, et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production[J]. Aquaculture, 2007, 270(1): 1-14.
- [18] MARINHO-SORIANO E, AZEVEDO C A A, TRIGUEIRO T G, et al. Bioremediation of aquaculture wastewater using macroalgae and *Artemia*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(1): 253-257.
- [19] MOHANTY R K. Feeding management and waste production in semi-intensive farming of *Penaeus monodon* (fab.) at different stocking densities[J]. Aquaculture International, 2001, 9(4): 345-355.
- [20] 卢德勋. 系统动物营养学导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 111-113.
LU Dexun. An introduction to systems-nutrition of animals[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 111-113.
- [21] 邵青, 杨阳, 王志铮, 等. 水产养殖动物补偿生长的研究进展[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2004, 4: 334-342, 346.
SHAO Qing, YANG Yang, WANG Zhizhen, et al. Preliminary progress in research of aquatic cultured animals compensatory growth[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2004, 4: 334-342, 346.
- [22] ALI M A, NICIEZA A G, WOOTTON R J. Compensatory growth in fishes: a response to growth depression[J]. Fish & Fisheries, 2003, 4(2): 147-190.
- [23] MACIEL J C, FRANCISCO C J, MIRANDA-FILHO K C. Compensatory growth and feed restriction in marine shrimp production, with emphasis on biofloc technology[J]. Aquaculture International, 2018, 26(1): 203-212.
- [24] MOHANTY R, MISHRA A, PANDA D, et al. Effects of water exchange protocols on water quality, sedimentation rate and production performance of *Penaeus monodon* in earthen ponds[J]. Aquaculture Research, 2014, 46(10): 2457-2468.
- [25] MOHANTY R, MOHAPATRA A. Cyclic feed restriction on growth compensation in *Penaeus monodon* (Fabricius): science meets practice[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2017, 46: 2008-2016.
- [26] ZHANG P, ZHANG X, LI J, et al. Starvation resistance and metabolic response to food deprivation and recovery feeding in *Fenneropenaeus chinensis* juveniles[J]. Aquaculture International, 2008, 17(2): 159.
- [27] KUMLU M, KIR M, YILMAZ O, et al. Growth of over-wintered and pre-seasonally produced post-larvae of *Penaeus semisulcatus* in the subtropics[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2010, 10: 269-276.
- [28] FÓES G, KRUMMENAUER D, LARA G, et al. Long term storage and the compensatory growth of white shrimp *Litopenaeus vannamei* in aquaculture ponds[J]. Latin American Journal of Aquatic Research, 2016, 44: 588-594.
- [29] ANAND P S S, KUMAR S, PANIGRAHI A, et al. Effects of C: N ratio and substrate integration on periphyton biomass, microbial dynamics and growth of

- Penaeus monodon* juveniles[J]. Aquaculture International, 2013, 21(2): 511-524.
- [30] FOCKEN U, GROTH A, COLOSIO R M, et al. Contribution of natural food and supplemental feed to the gut content of *Penaeus monodon* Fabricius in a semi-intensive pond system in the Philippines[J]. Aquaculture, 1998, 164(1): 105-116.
- [31] 薛素燕, 毛玉泽, 方建光, 等. 中华原钩虾的胚胎发育及其与水温的关系[J]. 水产学报, 2016, 40(11): 1705-1712.
- XUE Suyan, MAO Yuze, FANG Jianguang, et al. The embryonic development of *Eogammarus possjeticus* and its relationship with variation in incubation temperature[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(11): 1705-1712.
- [32] XUE S, FANG J, ZHANG J, et al. Effects of temperature and salinity on the development of the amphipod crustacean *Eogammarus sinensis*[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(5): 1010-1017.
- [33] 刘艳春, 苑春亭, 蒋万钊, 等. 藻钩虾在池塘生态养虾中的利用[J]. 齐鲁渔业, 2007, 24(1): 28-29.
- LIU Yanchun, YUAN Chunting, JIANG Wanzhao, et al. Utilization of *Amphihloe japonice* in pond ecology[J]. Shandong Fisheries, 2007, 24(1): 28-29.
- [34] MARAPPAN J, MUTHUSAMY D, SELVASEKAR T, et al. Ecosystem characteristics and environmental regulations based geospatial planning for sustainable aquaculture development[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(16): 2430-2445.
- [35] BURFORD M A, THOMPSON P J, MCINTOSH R P, et al. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize[J]. Aquaculture, 2003, 219(1): 393-411.
- [36] BURFORD M A, THOMPSON P J, MCINTOSH R P, et al. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system[J]. Aquaculture, 2004, 232(1): 525-537.
- [37] 陈亮亮, 董宏标, 李卓佳, 等. 生物絮团技术在对虾养殖中的应用及展望[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 103-108.
- CHEN Liangliang, DONG Hongbiao, LI Zhuojia, et al. Review of the application and perspective of biofloc technology in shrimp culture[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 103-108.
- [38] AVNIMELECH Y. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds[J]. Aquaculture, 2007, 264(1): 140-147.
- [39] KUHN D D, BOARDMAN G D, LAWRENCE A L, et al. Microbial floc meal as a replacement ingredient for fish meal and soybean protein in shrimp feed[J]. Aquaculture, 2009, 296(1): 51-57.
- [40] DE SCHRYVER P, CRAB R, DEFOIRD T, et al. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture[J]. Aquaculture, 2008, 277(3): 125-137.
- [41] MEGAHED M, MOHAMED K. Sustainable growth of shrimp aquaculture through biofloc production as alternative to fishmeal in shrimp feeds[J]. Journal of Agricultural Science, 2014, 8(4): 331-341.
- [42] 张家松, 陈亮亮, 冯震华, 等. 人工基质在对虾养殖中的应用[J]. 海洋科学, 2016, 40(9): 135-139.
- CHEN Jiasong, CHEN Liangliang, FENG Zhenhua, et al. Review of application of artificial substrates in shrimp culture[J]. Marine Sciences, 2016, 40(9): 135-139.
- [43] KEWCHAROEN W, SRISAPOOME P. Probiotic effects of *Bacillus* spp. from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) on water quality and shrimp growth, immune responses, and resistance to *Vibrio parahaemolyticus* (AHPND strains)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 94: 175-189.
- [44] 郑宗林, GATLIN D M, PEREDO A M. 益生菌和益生元在水产养殖中应用新进展[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 5: 54-58.
- ZHENG Zonglin, GATLIN Delbert M, PEREDO Anjelica M. New progress of probiotics and prebiotics in aquaculture[J]. Cereal & Feed Industry, 2015, 5: 54-58.
- [45] NIMRAT S, SUKSAWAT S, BOONTHAI T, et al. Potential *Bacillus* probiotics enhance bacterial numbers, water quality and growth during early development of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Veterinary Microbiology, 2012, 159: 443-450.
- [46] ARIAS-MOSCOSO J L, ESPINOZA-BARRÓN L G, MIRANDA-BAEZA A, et al. Effect of commercial probiotics addition in a biofloc shrimp farm during the nursery phase in zero water exchange[J]. Aquaculture Reports, 2018, 11: 47-52.
- [47] CRAB R, DEFOIRD T, BOSSIER P, et al. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges[J]. Aquaculture, 2012, 356/357: 351-356.
- [48] 李云梦. 凡纳滨对虾养殖池塘中的微生物调控作用及机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LI Yunmeng. The role and mechanism of microbial regulation in white shrimp *Litopenaeus vannamei* farming ponds[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [49] YOGEV U, ATARI A, GROSS A. Nitrous oxide emissions from near-zero water exchange brackish recirculating aquaculture systems[J]. Science of The Total Environment, 2018, 628/629: 603-610.
- [50] FANG J G, ZHANG J, XIAO T, et al. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2016, 8: 201-205.
- [51] NING Z, LIU S, ZHANG G, et al. Impacts of an inte-

- grated multi-trophic aquaculture system on benthic nutrient fluxes: a case study in Sanggou Bay, China[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 221-232.
- [52] SHI H, ZHENG W, ZHANG X, et al. Ecological-economic assessment of monoculture and integrated multi-trophic aquaculture in Sanggou Bay of China[J]. *Aquaculture*, 2013, 410: 172-178.
- [53] LI R, LIU S, JING Z, et al. Sources and export of nutrients associated with integrated multi-trophic aquaculture in Sanggou Bay, China[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 285-309.
- [54] WIK T E I, LINDÉN B T, WRAMNER P I. Integrated dynamic aquaculture and wastewater treatment modeling for recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(3): 361-370.
- [55] TROELL M, HALLING C, NEORI A, et al. Integrated mariculture: asking the right questions[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1): 69-90.
- [56] NEORI A, CHOPIN T, TROELL M, et al. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture[J]. *Aquaculture*, 2004, 231(1): 361-391.
- [57] NEORI A, MSUYA F E, SHAULI L, et al. A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15(6): 543-553.
- [58] 毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3230-3237.
- MAO Yuze, LI Jiaqi, XUE Suyan, et al. Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in integrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3230-3237.
- [59] 章守宇, 刘书荣, 周曦杰, 等. 大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 2004-2014.
- ZHANG Shouyu, LIU Shurong, ZHOU Xijie, et al. Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 2004-2014.
- [60] MILANESE M, CHELOSSI E, MANCONI R, et al. The marine sponge *Chondrilla nucula* Schmidt, 1862 as an elective candidate for bioremediation in integrated aquaculture[J]. *Biomolecular Engineering*, 2003, 20(4): 363-368.
- [61] PETERSEN J K, SAUREL C, NIELSEN P, et al. The use of shellfish for eutrophication control[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(3): 857-878.
- [62] LICCIANO M, STABILI L, GIANGRANDE A. Clearance rates of *Sabella spallanzanii* and *Branchiommata luctuosum* (Annelida: Polychaeta) on a pure culture of *Vibrio alginolyticus*[J]. *Water Research*, 2005, 39(18): 4375-4384.
- [63] LAURITSEN D D, MOZLEY S C. Nutrient excretion by the asiatic clam *Corbicula fluminea*[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(2): 134-139.
- [64] JONES A B, DENNISON W C, PRESTON N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study[J]. *Aquaculture*, 2001, 193(1): 155-178.
- [65] STABILI L, LICCIANO M, GIANGRANDE A, et al. Filtering activity of *Spongia officinalis* var. *adriatica* (Schmidt) (Porifera, Demospongiae) on bacterioplankton: implications for bioremediation of polluted seawater[J]. *Water Research*, 2006, 40(16): 3083-3090.
- [66] 陈军, 王德祥, 欧徽龙, 等. 海绵动物原位移植的研究进展[J]. *水产学报*, 2015, 39(12): 155-162.
- CHEN Jun, WANG Dexiang, OU Huilong, et al. Progress on in situ aquaculture of marine sponges with medicine potential[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(12): 155-162.
- [67] TAYLOR M W, RADAX R, STEGER D, et al. Sponge-associated microorganisms: evolution, ecology, and biotechnological potential[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2007, 71(2): 295-347.
- [68] 于瑞海, 王如才. 虾池的综合利用[J]. *海洋科学*, 1991, 15(1): 7-8.
- YU Ruihai, WANG Rucui. Comprehensive utilization of shrimp ponds[J]. *Marine Sciences*, 1991, 15(1): 7-8.
- [69] BOYNTON W R, GARBER J H, SUMMERS R, et al. Inputs, transformations, and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries[J]. *Estuaries*, 1995, 18(1): 285-314.
- [70] WU H J, GUO S L. The effect of hydrological regime on phytoplankton community[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12: 51-55.
- [71] LARA G, KRUMMENAUER D, ABREU P, et al. The use of different aerators on *Litopenaeus vannamei* biofloc culture system: effects on water quality, shrimp growth and biofloc composition[J]. *Aquaculture International*, 2016, 25(1): 1-16.
- [72] BARRAZA-GUARDADO R H, ARREOLA-LIZÁRRAGA J A, MIRANDA-BAEZA A, et al. Enhancing ecoefficiency in shrimp farming through interconnected ponds[J]. *BioMed Research International*, 2015: 873748.
- [73] OTOSHI C A, NAGUWA S S, FALESCH F C, et al. Shrimp behavior may affect culture performance at super-intensive stocking densities[J]. *Global Aquaculture Advocate*, 2007, 2: 67-69.

- [74] HUNTINGFORD F A, ADAMS C, BRAITHWAITE V, et al. Current issues in fish welfare[J]. *Journal of Fish Biology*, 2006, 68: 332-372.
- [75] CONTE F. Stress and welfare of culture fish[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 86(3): 205-223.
- [76] 潘金晶. 基于 RBF 神经网络的溶解氧预测模型研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
PAN Jinjing. Study on the model of dissolved oxygen prediction based on RBF neural network[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [77] ROZARIO A P R, DEVARAJAN N. Monitoring the quality of water in shrimp ponds and forecasting of dissolved oxygen using Fuzzy C means clustering based radial basis function neural networks[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, 12(1): 4855-4862.

Wastewater treatment for shrimp culture: Concepts and strategies

YU Dao-de¹, SONG Jing-jing¹, LIU Kai-kai¹, YE Hai-bin², WANG Xiao-lu²,
WANG You-hong², LIU Hong-jun²

(1. Marine Aquaculture Technology Engineering Research Center in Shandong Province, Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China; 2. Key Laboratory of Disease Control for Aquaculture in Shandong Province, Marine Science Research Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China)

Received: Aug. 10, 2020

Key words: shrimp; water treatment; compensatory growth; welfare biology; concepts and strategies

Abstract: The aim of this review is to provide a broad outline of the current apprehensions and constrictions of several issues associated with wastewater treatment for shrimp culture, a domain of surging public concern. The mainstream strategies for wastewater treatment are the “subtraction strategy” water management practice, the “decreasing-inputs” method, the probiotics and bio floc technology based on the microorganism, and the integrated multitrophic aquaculture system. In this study, the significance of diverse aspects has been explored, especially from various crucial and most overlooked particulars, such as water conservation aquaculture, ecological water replenishment, fine-scale feeding tactic, compensatory growth, live prey or feed, biofilter and water hydrology, and ultimately the essential that constructs the integrated assessment system based on the shrimp welfare biology. This research has been conducted with the objective of furnishing a proficient illustration for sustainable shrimp culture advancement and viable aquaculture.

(本文编辑: 杨 悦)