

刘国锋, 徐跑, 吴霆, 等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 225-233.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.01.033

中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路

刘国锋¹, 徐跑¹, 吴霆², 徐增洪¹, 徐刚春¹

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081; 2. 宝应县水产技术指导站, 江苏 宝应 225800)

摘要: 中国水产养殖业发展迅速, 但受土地、环境、技术和人工等资源的限制, 目前已经到了发展的瓶颈期。本研究总结过去近 40 年来水产养殖业快速发展带来的水环境氮磷污染负荷和环境效应, 以及相应的养殖水体治理措施, 提出了新型水产养殖模式的优势。未来水产养殖业在“提质增效、减量增收、绿色发展、富裕渔民”的总目标下, 必须转变生产方式, 调整生产结构, 通过持续深化渔业供给侧结构性改革, 从苗种、饲料、技术、装备、机制和生产模式等方面着手, 提高水产养殖的技术水平, 提升渔民增收致富的能力和水产品品质, 为中国水产养殖业的可持续发展奠定坚实的基础。

关键词: 水产养殖; 污染物; 水环境; 水质净化; 养殖模式

中图分类号: S9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)01-0225-09

Present condition of aquaculture nitrogen and phosphorus environmental pollution and future development strategy

LIU Guo-feng¹, XU Pao¹, WU Ting², XU Zeng-hong¹, XU Gang-chun¹

(1. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Wuxi 214081, China; 2. Fisheries Technical Guidance Station of Baoying County, Baoying 225800, China)

Abstract: Aquaculture industry has been developed rapidly in China, but it is stepping into the bottleneck period because of the restriction by natural resources such as land, environment, technology and artificial resources. This study summarized the water environmental pollution load and the environmental effect in the past 40 years, and put forward some corresponding measures of aquaculture water treatment, and also pointed out the advantages of the new aquaculture mode. To ensure the overall goal of improving quality and effectiveness, reducing yield and increasing income, green development, enriching fishermen, the mode and structure of production must be changed and adjusted. To lay a solid foundation for the sustainable and healthy development of aquaculture in China, we should improve aquaculture technology from the aspects of seed, feed, technology, equipment, mechanism and the mode of production, increase the ability of fishermen's getting rich and improve the quality of aquatic products by the continuous deepening structural reform of fishery supply-side.

Key words: aquaculture; pollutants; water environment; water purification; aquaculture model

收稿日期: 2017-07-09

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(16)1004]; 江苏省水产三新工程项目(D2016-18、Y2016-11)

作者简介: 刘国锋(1979-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副研究员, 主要从事水环境生态及污染生态治理研究。(E-mail) 308390036@qq.com

通讯作者: 徐跑, (E-mail) xup@ffrc.cn

1 中国水产养殖发展现状

自改革开放以来, 农业生产结构开始调整, 水产养殖行业得到快速发展, 养殖面积、养殖品种和水产品产量连续 26 年居世界第一位, 中国是全球唯一的水产养殖产量大于捕捞产量的国家。据统计, 2014

年全国水产品总产量达 6.462×10^7 t, 渔业产值达 1.086×10^{11} 元, 渔业经济总产值超 2.000×10^{12} 元, 水产品总产量约占全球水产品量的 40.00%。全国淡水养殖总面积为 6.08×10^6 hm^2 , 其中池塘养殖面积为 2.66×10^6 hm^2 , 约占 43.75%。池塘养殖是中国淡水养殖中最重要的组成部分, 约 71.20% 的水产品来自池塘养殖, 池塘养殖的平均产量为 7 852.00 kg/hm^2 。中国水产养殖产量占世界水产养殖总产量的 71.00%, 占全国水产总产量的 74.00%^[1]。水产养殖已成为世界上增加蛋白质来源最迅速、最可靠的方式之一^[2]。在巨量的水产品中, 来自淡水(池塘、湖泊、水库)、海水和工厂化养殖系统等的养殖产品占据了重要的份额。但是, 世界上水产养殖生产很大部分来自小规模生产的发展中国家, 受经济利益的驱使, 常采用高投入、高产出的方式来实现高收入, 忽视了养殖水域的生态平衡和水环境的保护, 以致养殖水域环境出现快速污染的现象, 导致水体出现以氮磷过量富集为主的水体富营养化现象, 从而影响水产养殖业的持续健康发展。

中国有 1.80×10^4 km 的海岸线, 24 800 多个湖泊, 面积达 6.86×10^6 km^2 , 加上长江和黄河 2 大河流域及温暖的气候条件, 使得中国发展水产养殖业具有得天独厚的自然条件, 目前中国内陆可养殖水面积超过 70 000.00 hm^2 , 养殖了 200 多种鱼类和 300 多种不同的水生物种。中国最常见的养殖品种是号称中国四大家鱼的鲤科鱼类, 即青鱼、草鱼、鲢鱼和鳙鱼。当前水产养殖品种包括传统的四大家鱼和鲤鱼、鲫鱼、鳊鱼, 并增加了罗非鱼、优质鲫、加州鲈、鲟鱼、罗氏沼虾、青虾、河蟹等新品种。2015 年, 中国罗非鱼的产量为 1.77×10^6 t, 淡水蟹的产量为 8.00×10^5 t, 淡水小龙虾的产量为 7.00×10^5 t, 黄鳝(亚洲沼泽鳗鱼, *Asian swamp eel*) 的产量为 2.50×10^5 t, 日本鳗鱼的产量为 3.50×10^5 t, 甲鱼/鳖的产量为 3.50×10^5 t。养殖方式从传统的粗养向精养、集约化、规模化方向发展, 并建立了养殖基地、苗种基地和饲料基地, 从单一养殖向混养、间养、套养、立体养殖和生态养殖方向发展^[3-4]。

鉴于当前水产养殖活动在为居民提供种类丰富的优质蛋白和渔民增收等方面的重要地位, 水产养殖仍是水产品输出和渔民致富的主要渠道。然而, 受水资源供应有限和土地面积缺乏等先天因素以及养殖基础设施差, 水产品遗传性状退化, 环境污染

重, 生产力下降, 养殖成本上涨, 养殖户经济效益下降等多重因素影响, 当前中国水产养殖业面临着巨大的挑战, 尤其是随着集约化水产养殖模式的迅猛推进和发展, 水质恶化和废水排放直接制约了养殖产业的可持续发展^[5-6]。养殖过程中饵料的过量投入, 残饵的分解, 排泄物的产生以及化学药品和抗生素的使用等, 使水体中营养物质、有机碎屑等严重超标, 导致养殖水域生态系统失衡, 病害滋生, 加剧了水体环境的恶化^[7]。为确保水产养殖业持续健康发展, 必须降低养殖废水排放对周边环境的污染, 改善养殖水域环境。对水产养殖环境污染的认识、管理和治理措施引起了相关管理者、研究者和消费者的深度关注^[8]。

良好的水域生态环境是水生经济动植物赖以生存和发展的重要保证, 是维持水产养殖业可持续发展的基本前提^[7-8]。因此, 本文针对当前中国水产养殖业发展现状, 探讨了因残饵、粪便和动植物残体等过量聚集到池塘底部, 造成池塘水环境生态恶化的原因, 因氮磷过量聚集造成水质富营养化的原因, 养殖水体治理方式以及新技术的发展和应用, 中国渔业养殖未来发展破除技术壁垒并进行技术装备升级等方面的发展需求。

2 水产养殖对水环境的氮磷污染状况

中国水产养殖主要以池塘、湖泊、水库和海水网箱等传统养殖方式为主, 并逐步发展了工厂化、循环水等新型养殖系统, 其中传统方式的养殖面积占总养殖面积的 93.0%, 水产品产量占 91.0%^[9]。然而, 当前的水产养殖业布局和规划总体呈无序的状态, 养殖从业者专业技术水平低下, 从而导致养殖者不顾环境容量和生态变化, 盲目扩大养殖规模, 增加养殖密度, 随意排放养殖废水, 造成渔业水域环境恶化。养殖系统类型和养殖品种决定了养殖过程中产生废物的质和量的差异^[10]。大量直接排放的养殖废水, 是农业面源污染的重要组成部分。中国重要水系之一的太湖流域濠湖水系, 2008 年主要水体污染物排放中, 水产养殖排放的化学需氧量(COD)、铵氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)和总氮(TN)分别为 2 115 t、626 t、346 t 和 659 t, 占农业污染物(包括农村生活、农田、水产和畜禽养殖)总量的比重分别为 23.7%、41.6%、55.6%和 22.1%^[11]。

2.1 养殖种类对水环境的氮磷污染及影响

随着养殖业的快速发展,中国目前形成了以人工养殖(海水养殖、内陆淡水养殖)为主,海洋捕捞为辅的产业结构。但在局部地区存在产业结构布局失衡的问题,沿海 12 个省市的海洋与内陆水产品产

量占全国养殖总产量的 79%,占水产总产量的 48%^[12]。随着淡水养殖面积的增加,养殖产量也呈逐年增加的趋势,水产养殖产量多年位居世界首位(表 1)。

表 1 2015-2016 年中国水产养殖产量变化

Table 1 China's aquaculture production in 2015-2016

指标	养殖总产量($\times 10^4$ t)		海水养殖产量($\times 10^4$ t)		淡水养殖产量($\times 10^4$ t)	
	2015 年	2016 年	2015 年	2016 年	2015 年	2016 年
鱼类	2 845.77	2 950.30	130.76	134.76	2 715.01	2 815.54
甲壳类	412.55	440.88	143.49	156.46	269.06	284.42
贝类	1 384.60	1 447.36	1 358.38	1 420.75	26.22	26.61
藻类	209.81	217.81	208.92	216.93	0.89	0.88
其他	85.17	86.03	34.08	34.23	51.09	51.80
总计	4 937.90	5 142.38	1 875.63	1 963.13	3 062.27	3 179.25

水产养殖对周围环境的影响程度取决于养殖规模、种类和水平,不同类型水产养殖系统向周边水域环境中排放废物的种类(主要是氮磷及有机污染)和数量也不尽相同,其排放废物不同成分的质和量的差异主要与养殖系统的表现形式、养殖品种、养殖密度和饵料系数等有关,但是残饵和粪便依然是鱼虾池中氮磷等污染物的主要来源。

2.1.1 鱼类 现代水产养殖业主要以追求高效益为目的,鱼类养殖多采用高密度、高投入来获取高收益,同时也因大量残饵和粪便造成周边水域环境污染加剧。淡水养殖中每生产 1 kg 的渔获物可产生 162 g 有机废物,其中包括 50 g 蛋白质,31 g 脂质,81 g 碳水化合物,其废物将会产生 30 g 总氮,7 g 总磷^[10]。在网箱虹鳟养殖系统中,以饵料和鱼苗形式人为输入的氮只有 27%~28%,通过鱼的收获而回收,其中 23% 积累于沉积物中,固体废物的沉积率为 149.6 g/(m²·d)^[13]。鱼类精养一般采取高密度养殖方式,并大量投喂人工合成的外源性饵料,大量残饵和排泄物进入到水体后对水环境产生较大影响。如骆马湖 1998 年度湖体内网围养殖入湖氮、磷量分别为 339 t 和 57 t,占湖体滞留氮、磷总量的 27%和 33%^[14]。孙云飞等^[15]研究发现,不同养殖模式下,饵料氮、磷输入是养殖系统氮、磷输入的主要途径,分别占总输入的 85%~93%和 83%~84%,而系统氮的输出则以养殖生物为主,占 62%~77%,

其次是沉降到池底的底泥,占 13%~15%,磷的输出则以底泥为主,占 76%~80%。根据以上的研究结果,建议采用草鱼+鲢鱼+鲤鱼的混养模式,有效降低系统中氮、磷的积累量,提高其利用率。高密度、高投饵的网箱养殖系统,更是一种持续的污染源。Braaten 等^[16]曾对鲑鱼网箱养殖代谢负荷进行研究,发现投喂饵料中的 20% 不能被鱼类利用,一个年产 60 t 的人工投饵网箱养殖鲑鱼的养殖场,每年排放的有机废物大约相当于居住 2 000~6 000 人的建筑单元每年排放的有机废物量。鱼类养殖过程中产生的大量有机废物和无机废物的排放,尤其是在一些半封闭湾口水域中,常造成水域有机污染负荷加重,水体富营养化,进而造成水体浮游生物和大型底栖动物的生物量、丰度和种类减少^[17]。

2.1.2 虾类 虾类养殖对周围环境的污染及影响程度取决于生产水平和养殖规模。在精养虾池中,人工饵料输入的氮占总输入氮的 90%,其中仅 19% 被虾吸收利用,8%~12% 以颗粒态、可溶性有机氮和无机氮等形式存在于水体中,62%~68% 积累于塘底^[18]。陈东兴等^[13]通过对 3 种虾类养殖池塘的氮磷污染排放情况进行研究发现,青虾、南美白对虾和罗氏沼虾养殖池塘 TN 的实际排放强度分别为 37.20 kg/hm²、181.00 kg/hm²、148.00 kg/hm²,TP 的实际排放强度分别为 7.78 kg/hm²、46.80 kg/hm²、34.50 kg/hm²,高锰酸盐指数(COD_{Mn})的实

际排放强度分别为 216.00 kg/hm²、812.00 kg/hm²、575.00 kg/hm²,总悬浮物(TSS)的实际排放强度分别为 464.00 kg/hm²、2 277.00 kg/hm²、1 730.00 kg/hm²,而且实际测算的排放强度均超过估算的排放强度,此研究结果要高于其他研究所得结果,这可能是由于南美白对虾和罗氏沼虾属于高密度养殖,其代谢排泄物和在养殖过程中的部分饵料溶入水中变为悬浮物,造成水体污染所致^[19]。

2.1.3 贝类 贝类作为滤食性经济水产动物,其排泄的粪便中含有较高的有机质。相关研究结果表明,贝类养殖水体每年可产生氮 8.5 kg/m²^[20]。贝类养殖通常是以筏式养殖为主,这种养殖方式常会改变水体流速、流向,减缓水体交换和物质循环,导致养殖水域悬浮物大量淤积。大量淤积的底泥中含有未矿化分解的有机质,会增强微生物活性,增大养殖塘底部耗氧量,造成缺氧或无氧环境,使得底泥中产生大量有害气体。

水产养殖经济效益的获取,主要是通过高投入追求高产量而达到的,大量投入的人工饵料有相当大的一部分直接进入水体中,加之水产养殖物的排泄物和水产品的残体等多种物质进入水体后,发生一系列生物化学反应,均将导致水体的溶解氧(DO)和pH值发生变化^[21]。水体pH下降,影响水产养殖物的呼吸、代谢、生长等,从而影响水产养殖物的代谢活性、摄食能力和抗病力。杨庆霄等^[22]研究发现,过量的虾饵大部分沉淀于池底,残饵的分解使池底海水中DO含量和pH值迅速下降。

随着市场上对水产品需求量和品种多样化需求的增加,目前中国的水产养殖依然处于高密度、集约化的状态,并向规模化、名优化方向发展,形成了高密度、高投入、高产出、高污染的养殖现状和格局,导致水产品生物量超过水体可承载的容量。大量残饵、肥料、生物代谢废物在养殖水域中过量累积,水体自净能力下降,养殖环境污染日益严重^[23]。氮、磷收支研究结果表明,仅有 31.89%的氮进入机体后转化为鱼体组织,52.50%随尿液(以氨、尿素和尿酸的形式)排出,15.61%随粪便排出,进入水体环境;进入水体环境中磷的比例超过了氮,达到投饵量的 70.20%,其中的 5.10%和 65.10%分别随尿和粪便排出体外^[8]。表明饵料是养殖塘中氮、磷输入的主要来源,占到总输入的 68.00%~92.00%和 73.00%~91.00%,饵料中的氮、磷仅有 14.00%~

21.00%和 7.00%~10.00%转化为鱼虾的生物量^[24-27]。Alabaster^[28]对虹鳟鱼池塘养殖系统进行研究发现,固体排泄物占投饵量的 40.00%~50.00%。杨逸萍等^[29]在研究人工投饵虾池固体废弃物代谢负荷时发现,30.00%的饲料因不能被虾利用而沉淀于池底。以上研究结果说明,投入到虾塘中的饵料有 60.00%~80.00%将会进入水体,成为养殖水体污染物的主要来源之一。因此,未来必须着眼于提高饵料中氮磷的生物保留率,从而减少养殖水体的污染负荷,同时这也是提高饵料利用效率,降低养殖成本的重要措施。

2.2 水产养殖沉积物有机质的富集及环境效应

当前的养殖活动,无论是传统的四大家鱼品种还是名特优品种,无论是传统的养殖,还是集约化、规模化养殖,均需向养殖塘中投入大量的人工饵料,而投入的饵料经过养殖生物的代谢排入水中,以碎屑物、溶解性物质、次生物质、生物残体及降解有机物等形式通过各种途径进入到水体并沉降到塘底,成为沉积物有机质的来源。有研究认为,鱼塘有机质的年沉积速率为 5 cm^[30]。养殖场颗粒有机碳沉积通量的主要来源是幼鱼饵料,表层沉积物有机碳含量与养殖场养殖密度和饵料投加量的变化趋势相同^[31]。富含蛋白质和淀粉的人工饵料,进入水体后以残饵、鱼类排泄物等形式与衰亡藻类一起成为鱼塘沉积物有机质的主要来源^[32-33]。通过鱼虾、水流等扰动,经过再悬浮、矿化分解、释放等过程,养殖塘底部沉积物中的碳、氮、磷等物质会回到水体环境中,增加水体环境的负荷。因此,池塘底质环境常成为养殖环境中污染物的聚集地,形成养殖环境污染的源和汇。有研究结果表明,非开放式养殖系统(如网箱、池塘等)底质中氮、磷和耗氧物的含量要明显高于周围水体^[34]。Smith等^[35]对精养虾池中物质平衡的研究结果表明,只有 10%的氮和 7%的磷在虾类养殖过程中被利用,其余都以各种形式进入沉积物中。在工厂化高密度水产养殖系统中,每天所投饵料(干物质)的 25%以上是以固体废弃物的形式排入水体中,并最终沉降到池底^[36]。中国 80%以上的工厂化水产养殖主要靠大量换水来改善水质,每天频繁的水体交换量,加剧了环境污染^[37]。网箱养殖下排出的废弃物中氮、磷含量分别为 23%和 51%~59%,每养殖 1 t 鱼,排入环境中的氮、磷达 161 kg 和 32 kg^[38]。据统计,中国黄渤海养殖区

1985-2002年氮、磷和COD的平均浓度与该区历年水产品养殖产量的相关分析结果表明,氮含量、磷含量、COD含量与水产品产量成正相关,其中无机氮平均浓度与虾养殖产量呈显著正相关^[39]。

池塘营养物质中氮、磷的输入饲料分别占90%~98%和97%~98%,氮、磷的输出中,渔获物仅占总输出的20%~27%和8%~24%,沉积的氮、磷占54%~77%和72%~89%,表明饲料中氮、磷除小部分供给养殖鱼类的生长外,大部分沉积于池底,沉积在池底的残饵、粪便及动植物残体中,在微生物的分解过程中,驱动营养物质的吸附、解析,从而引起营养盐的释放。有研究发现,水产养殖沉积物营养盐释放的速率最大^[40],泻湖水产养殖区有机质多富集于沉积物表层,间隙水中的营养盐浓度比对照高10~20倍^[41]。与1年软体动物养殖区相比,连续2年的养殖区中沉积物有机质含量较高,并且水-沉积物界面硅、氨和硫酸盐的释放速率明显较高^[42]。养殖塘底泥释放的营养盐以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 等为主^[43-45]。有机质分解后,会有效调节池塘水体中生物可利用性营养物质的浓度、形态及其比例,进而从根本上影响初级生产力以及水产品的产量和质量^[46]。沉积物多由残饵、粪便和动植物残体等组成,富含易降解的有机质成分。通过对池塘沉积物中有机质分解的机制进行研究,发现微生物以异养菌为主,具有较强水解淀粉能力的芽孢杆菌较为多见^[32,47]。此外,高温季节底层缺氧,氨化细菌会剧增,导致水体中氨氮和亚硝酸盐含量过高,从而对水产品产生毒害作用^[48-49]。

有机质富集的重要环境效应是易造成底层缺氧,从而带来一系列不良影响和后果,如产生氨氮、硫化氢和亚硝酸盐,从而使水产养殖物抗性下降,易发病。大量沉降在塘底的残饵、排泄物和动植物残体等在分解过程中产生大量有毒的氨氮,其在高浓度时对水产养殖物有毒害作用,即使在安全阈值下,也会影响水产养殖物的功能,如破坏渗透调节能力,增加身体耗氧量,阻碍体内氮的排泄等,进而导致水产养殖物的抵抗力下降,易发生病害^[36,50]。2004年,因病害造成全国水产品产量大幅下滑,直接经济损失达 1.50×10^{10} 元^[51]。水体氨氮对日本对虾幼体毒性作用明显,其各期幼体死亡率随着氨氮浓度升高明显上升^[52]。亚硝酸盐对草鱼的急性胁迫试验发现,在亚硝酸盐胁迫下草鱼的红细胞(RBC)形态

和功能均会产生显著变化^[53]。

鱼类会摄食底栖动物,从而影响其群落数量和种群结构。通过研究富营养化对底栖群落的影响,发现随着底栖氧饱和度的改变,底栖生物类群不断发生演替。由于残饵、排泄物和生物残体等在池底不断积累,底泥细菌和浮游细菌生物量均有所上升^[54-55]。

3 养殖水体环境污染的净化与养殖模式的转变

集约化水产养殖模式发展迅猛,但水质恶化和废水排放直接制约了养殖产业的可持续发展。养殖过程中饵料和排泄物的排放与分解,化学药品和抗生素的使用等,使水体中营养物质和有害物质等严重超标,严重损害了水体的自净和恢复能力^[5,56]。而在政府主导、养殖业自身发展需求等多种因素的作用下,无论是物理修复、化学修复和生物修复,还是原位修复和异位修复,养殖水体尤其是排放尾水的净化,对养殖水域生态环境的改善起到了较显著的作用。在确保水产养殖业发展的同时,减少养殖废水对周边环境的污染,突出水产生态健康养殖,加快推进水产养殖减药减排,继续推动重点流域水产养殖污染治理,加快池塘标准化改造,大力推广深水抗风浪养殖网箱和池塘循环水养殖等生态健康养殖新模式,是确保水产养殖业可持续发展的必然要求。

3.1 养殖水体传统净化技术措施

3.1.1 物理与化学措施 普通养殖废水和养殖尾水的净化处理有物理措施、化学措施和生物措施,每种处理措施都有其优势,并在一定范围内取得了较好的效果。物理修复措施多是利用各种人工材料,或利用机械对养殖环境施加物理影响,诸如换水、曝气、筛网过滤、泼洒沸石粉和石灰等,来吸附或消除有毒有害物质。但这类措施通常需要较高的投资和运转费用,其持续周期短,效果有限,常作为水体治理的一种辅助手段^[57]。化学修复措施多是把化学制剂投放到水体中,通过与污染物发生氧化、还原、沉淀、络合/聚合等反应,使污染物从养殖水体中分离、降解、沉淀。如采用高分子吸附剂等,把生物降解部分作为固体基质包被为生物膜后,进行水产养殖循环水系统的高含量氮的去除^[58]。有研究用聚合水凝胶去除养殖废水中的氮磷,磷酸盐去除率可达95%,亚硝酸去除率可达85%,硝酸盐去除率达

52%,有效减轻养殖废水排放氮磷的负荷^[59]。目前已有多种水质改良剂和水质消毒剂,并得到了广泛应用。但其大量应用易产生次生产物,加重水体自身净化负担,也易引起水产品品质退化。

在污水处理基础上发展起来的新型水处理技术,逐渐应用到养殖废水净化中,并取得了较好的效果,比如泡沫分离技术、膜分离技术、臭氧氧化技术、再生粉末活性炭水处理技术以及新材料(如新型光催化材料、阳离子表面活性剂、絮凝剂等)。但这些措施存在投资大,应用环境要求高,成本高昂等问题,或者因应用后残留在水体中的物质对鱼类有副作用,限制了其推广和应用。

3.1.2 生物措施 生物修复是利用具有生命活力的生物代谢活动减少或去除养殖水体中的有害物质。这种措施多是通过工程措施为生物(动物、植物、藻类、微生物)生长和扩繁提供必要条件,对污染物进行吸收、转化、降解和去除。与物理、化学等技术手段相比,生物修复方法具有耗时短、费用低、可持续应用、无次生污染物且不危害水产品品质等优势。在具体应用中,生物修复目前已形成多种形式,如生物浮床(水面上种植以空心菜、水芹菜等经济植物)、滤食性水生动物、人工湿地系统等,并取得了较好的效果^[7,60-67]。如陈春云等^[68]利用小球藻去除对虾养殖废水中的氮磷,水体氨氮、磷酸根的去除率达到了80%和85%,具有较好的水体净化效果,并且小球藻的生物量有较大提高。龚宏伟等^[69]利用构建的三级净化循环水养殖河蟹,水体中氮、磷含量均有明显下降。张少军等^[70]利用滤食性贝类牡蛎和紫贻贝去除养殖废水中的悬浮物,取得了较好效果,并且贝类还能吸收利用悬浮物中的有机物。

然而,受实施场地和外界环境条件的限制,生物修复措施的应用和推广受到诸多限制,尤其是以栽种水生植物为主的生物净化和人工构建的仿湿地生态系统措施,受实施场地和气温影响较大,其在北方养殖水体中的净化时间要远小于南方。在长江以南地区,受土地面积的限制,构建的湿地系统和水生植物净化面积无法达到设计要求。在生物修复的基础上,又形成了鱼虾蟹菜-水稻/菱、鱼菜-果树、稻-麦-虾-经济作物、鱼-畜/禽等复合循环立体生态种养技术,在进行水产品养殖的同时,通过食物链作用,控制水体中营养盐和浮游生物等的过量增殖,不仅可以实现增产增收,也同步实现了水体原位净化的

目的。

3.2 新型水产养殖模式将成为未来发展的主导方向

随着人们对产品质量要求的提高,未来水产品生产必将加快转型升级,产量增速将有所放缓。未来中国将持续加强生态环境的保护力度,随着资源约束趋紧,水产品产量增长空间将受到限制,加之劳动力成本不断上升,生产比较收益下降,调结构、转方式、提质增效已成为水产品生产关注的重点。在“以养为主、养捕结合”方针的指导下,水产养殖仍将是渔业生产增长的主要动力,养殖产量占水产品总产量的比重将持续增加。当前,全球经济复苏乏力,国外水产品进口需求持续不振,加之国内加工成本不断上升,部分加工企业向周边国家转移,给中国水产品进出口带来了巨大的下行压力。据研究,到2030年,为满足现有人均水产品的消费水平,水产养殖产量需增长 5×10^7 t,水产养殖产量占水产品总供应量的60%以上,未来水产养殖发展和经济增长潜力巨大,但也将面临更大的挑战^[71]。在2017年全国渔业渔政工作会议中,农业部于康震副部长提出要抓住“转方式、调结构”主线,咬定“提质增效、减量增收、绿色发展、富裕渔民”总目标,坚持“稳中求进、进中求好”工作总基调,持续深化渔业供给侧结构性改革,着力培育新动能,打造新业态,扶持新主体,拓宽新渠道,加快推进渔业转型升级的总体目标^[72]。因此,水产养殖行业未来发展必将着眼于在保持稳步增长的同时,通过转方式、调结构、促产量、提品质等技术进步来提高水产品的品质,必须通过结构优化、模式转变和技术升级等措施实现水产养殖业提质增效和可持续健康发展的目的。

4 展望

随着社会发展和技术进步和人民群众日益提高的生活需求,水产养殖业面临着技术升级、模式转变、提质增效的迫切发展需求。从未来发展方向来看,工业化循环水养殖因其具有资源节约型、环境友好型、技术先进型、养殖集约型、操作便易型、生产可控型、效益倍增型、产品优质型的八个优势,将成为养殖行业发展的主导方向^[73]。从理论发展和技术进步的角度看,未来将在物质能量收支理论-营养要素的精准供给与氮磷减排,生物滤器净化机理-生物滤器的标准化设计、评价标准和管理规范,环境与生

理互作机制生产过程的智能控制和精准养殖工艺,疫病与宿主病原的环境关系-安全产品和疫病预防预警管理等方面有所突破,形成标准化、模块化、智能化、产业化并普及推广,才能保证循环水养殖业走出一条健康的发展之路。

4.1 技术进步与产业结构的调整是渔业产业可持续发展的必由之路

针对当前水产养殖业的现状和未来发展需求与目标,必须通过调整产业结构,转变生产方式的形式来促进渔业的转型升级。需要从以下几方面着手:(一)抓渔业结构调整,走特色水产发展之路。以江苏省水产养殖业为例,到2016年,全省特种水产养殖面积占比接近70%,其中河蟹养殖面积 $2.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 左右,产值 3×10^{10} 元左右,小龙虾、青虾、罗氏沼虾、南美白对虾等虾类养殖面积也逐年扩大,虾类产值约 2×10^{10} 元,河蟹和虾类产值占总产值的比例超过40%,虾蟹经济的特色日益鲜明。(二)抓技术研发应用,走科技兴渔之路。要求强化产业技术创新体系建设,加大渔业核心品种与关键技术攻关力度,构建渔业科技创新平台。如江苏省在“十二五”期间,全省新品种、新技术及新模式累计推广面积达 $3.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$,而在新品种选育方面,形成了以太湖1号青虾、江丰1号斑点叉尾鮰、长江1号/2号河蟹等为主的新品种,不但为水产品添加了新种类,而且为渔民增收致富带来了切实效益。(三)抓发展方式转变,走生态健康之路。江苏省积极推进各地不同模式池塘工业化生态养殖系统的建设与运行,提高池塘综合利用率,养殖运动鱼、生态鱼、冲浪鱼,建立多种建设模式、运营模式,实现节能减排、产出高效、产品优质、环境友好的综合目标。(四)抓设施装备建设,走转型升级之路。要求渔业主管部门强化政策导向,从解决渔民群众最关心、最直接、最现实、最需要的实际问题入手,加大对重点渔区和渔业专业村的财政资金投入,不断增加渔业发展公共基础设施供给,切实提高公共服务共建能力和共享水平。(五)抓体制机制创新,走融合发展之路。渔业主管部门积极推进新型渔业经营主体建设,通过引进外部资本,以支持渔业科技、模式、品种、保险等进行有益的尝试与创新,并积极促进渔业一、二、三产业融合发展,积极探索水产品的大流通新模式(互联网+可追溯水产品等)。

4.2 全产业链的技术更新与体制、机制的创新是水产养殖业可持续健康发展的保障

渔业产业发展的结构,主要是通过调整渔业区域布局、产品结构、产业结构和要素配置来实现产业结构发展的调整调优。坚持控制总量并提高质量效益,将发展重心由注重数量增长转到提高质量和效益上来。根据渔业资源禀赋、市场需求和生态环境状况,科学确定产业发展规模和产品发展重点,秉承生态优先的原则,强化资源养护,科学有序利用渔业资源,依靠科技创新,强化科技支撑。既要推进生产经营方式创新、管理创新和制度创新,也要发挥现代科技对渔业的引领和支撑作用。据此,未来水产养殖业发展必将在以下方面有所突破:一是工业化和信息化深度融合。要求生产全过程(育种、育苗、营养饲料、病害防控)的科学化、规范化和标准化,养殖管理的自动化、精准化、数字化和信息化,养殖设施工程技术的普及化、大型化和产业化。二是要求有严格的法律法规来保障产业持续、稳定、健康发展。三是必须在核心技术方面有所突破,才能支撑产业发展长久不衰。目前,中国水产养殖科技发展水平(设施设备、生产管理、饲料营养、疫病防控、废水资源化利用等)与国外仍有较大差距,尤其是在工程设计、自动化控制和水处理工艺等方面,导致中国水产养殖成本居高不下。未来需要在新品种选育(如基因选育、基因改良等)、新型疫苗、新型抗病药、新型饲料等方面进行挖掘,形成完全自有的知识产权和技术,才能保证产业发展享受改革红利和技术进步带来的利好,从而保障渔民利益和行业的长远发展。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2014: 1-47.
- [2] 李 诺. 论水产养殖发展中的问题和今后研究的重点[J]. 齐鲁渔业, 1995(5): 18-20.
- [3] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2016: 1-52.
- [4] 赵安芳,刘瑞芳. 水产养殖对水环境的影响与污染控制对策[J]. 平顶山工学院学报, 2003, 12(4): 15-17.
- [5] LAI H T, HOU J H, SU C I, et al. Effects of chloramphenicol, florfenicol, and thiamphenicol on growth of algae *Chlorella pyrenoidosa*, *Isochrysis galbana*, and *Tetraselmis chui* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(2): 329-334.
- [6] MARINHO-SORIANO E, NUNES S O, CARNEIRO M A A, et

- al. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae* [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(2): 327-331.
- [7] 张秋卓,李华,王娟,等.生态农业园区水产养殖排水水生植物组合净化技术效果评估[J].*农业环境科学学报*, 2013, 32(6):1253-1260.
- [8] 吴伟,范立民.水产养殖环境的污染及其控制对策[J].*中国农业科技导报*, 2014, 16(2):26-34.
- [9] 农业部渔业局养殖课题组.我国主要水产养殖方式研究[J].*中国水产*, 2006(2):11-13.
- [10] 刘长发,蔡志仁,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, 17(3):220-226.
- [11] 闵继胜,孔祥智.我国农业面源污染问题的研究进展[J].*华中农业大学学报(社会科学版)*, 2016(2):59-66.
- [12] 高健,朱善国.我国水产养殖业产业结构现状与发展机遇[J].*中国渔业经济*, 2003(4):32-33.
- [13] 陈东兴,杨超,华雪铭,等.3种虾类养殖池塘污染强度及氮磷营养物质收支研究[J].*河南农业科学*, 2013, 42(8):132-136.
- [14] 黄文钰,许朋柱,范成新.网围养殖对骆马湖水体富营养化的影响[J].*农村生态环境*, 2002, 18(1):22-25.
- [15] 孙云飞,王芳,刘峰,等.草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支[J].*中国水产科学*, 2015, 22(3):450-459.
- [16] BRAATEN B, JAN A, ERVIK A, et al. Pollution problems on Norwegian fish farms [J]. *Aquaculture Ireland*, 1983, 26: 1-12.
- [17] 赵安芳,刘瑞芳,温琰茂.不同类型水产养殖对水环境影响的差异及清洁生产探讨[J].*环境污染与防治*, 2003, 25(6):362-364.
- [18] 计新丽,林燕棠,许忠能,等.海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J].*海洋环境科学*, 2000, 19(4):66-71.
- [19] 李绪兴.水产养殖与农业面源污染研究[J].*安徽农学通报*, 2007, 13(11):61-67.
- [20] KASPAR H F, GILLESPIE P A, BOYER I C, et al. Effects of mussel aquaculture on the nitrogen cycle and benthic communities in Kenepuru Sound, Marlborough Sounds, New Zealand [J]. *Marine Biology*, 1985, 85(2): 127-136.
- [21] 马从丽.水产养殖对渔业水域环境带来的影响与应对策略[J].*科技创新导报*, 2016(20):79-80.
- [22] 杨庆霄,蒋岳文,张昕阳,等.虾塘残饵腐解对养殖环境影响的研究 I. 虾塘底层残饵腐解对水质环境的影响[J].*海洋环境科学*, 1999, 18(2): 11-15.
- [23] 安鑫龙,周启星.水产养殖自身污染及其生物修复技术[J].*环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(9): 1-6.
- [24] 戴修赢,蔡春芳,徐升宝,等.饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷收支和污染强度的影响[J].*水生态学杂志*, 2010, 3(3):52-56.
- [25] 李纯厚,黄洪辉,林钦,等.海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究[J].*农业环境科学学报*, 2004, 23(3):545-550.
- [26] 李金亮,陈雪芬,赖秋明,等.凡纳滨对虾高位池养殖氮、磷收支研究及养殖效果分析[J].*南方水产科学*, 2010, 6(5):13-20.
- [27] CASILLAS-HERNÁNDEZ R, MAGALLÓN-BARAJAS F, PORTILLO-CLARCK G, et al. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: trays and mechanical dispersal [J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1): 289-298.
- [28] ALABASTER J S. Report of the EIFAC workshop of fish farm effluent [R]. Rome: FAO, 1982.
- [29] 杨逸萍,王增焕,孙建,等.精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支[J].*海洋科学*, 1999(1): 15-17.
- [30] RIISE J C, ROOS N. Benthic metabolism and the effects of bioturbation in a fertilised polyculture fish pond in northeast Thailand [J]. *Aquaculture*, 1997, 150: 45-62.
- [31] 黄洪辉,林钦,贾晓平,等.海水鱼类网箱养殖场有机污染季节动态与养殖容量限制关系[J].*集美大学学报*, 2003, 8(2): 101-105.
- [32] 王亚南,王保军,戴欣,等.近海养虾场底泥中产芽孢细菌的生态特征[J].*应用与环境生物学报*, 2004, 10(4):484-488.
- [33] YOKOYAMA H, ABO K, ISHIHI Y. Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios [J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1): 411-425.
- [34] 罗琳,舒廷飞,温琰茂.水产养殖对近海生态环境的影响[J].*水产科学*, 2002, 21(3): 28-30.
- [35] SMITH V H, TILMAN G D, NEKOLA J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 1999, 100(1): 179-196.
- [36] TIMMONS M B, EBELING J M, WHEATON F W, et al. Recirculating aquaculture systems [M]. 2nd ed. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002.
- [37] 李秀辰,张国琛,聂丹丹,等.水产养殖固体废物减量与资源化利用[J].*水产科学*, 2007, 26(5):300-302.
- [38] 陈祖锋,郑爱榕.海水养殖自身污染及污染负荷估算[J].*厦门大学学报*, 2004, 43(增):258-262.
- [39] 崔毅,陈碧鹃,陈聚法.黄渤海海水自身污染的评估[J].*应用生态学报*, 2005, 16(1): 180-185.
- [40] RICHARD M, ARCHAMBAULT P, THOUZEAU G, et al. Influence of suspended mussel lines on the biogeochemical fluxes in adjacent water in the Îles-de-la-Madeleine (Quebec, Canada) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, 63(6): 1198-1213.
- [41] MESNAGE V, OGIER S, BALLY G, et al. Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): influence of biodeposition by shellfish farming activities [J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 63(3): 257-277.
- [42] RICHARD M, ARCHAMBAULT P, THOUZEAU G, et al. Summer influence of 1 and 2 yr old mussel cultures on benthic fluxes in Grande-Entrée lagoon, Îles-de-la-Madeleine (Québec, Canada)

- [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 338: 131-143.
- [43] PORTER E T, OWENS M S, CORNWELL J C. Effect of sediment manipulation on the biogeochemistry of experimental sediment systems[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(6): 1539-1551.
- [44] 郁桐炳,沈丽红. 池塘淤泥对水中氮营养盐影响的初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(1):82-85.
- [45] 周劲风,温琰茂,李耀初. 养殖池塘底泥-水界面营养盐扩散的室内模拟研究: I 氮的扩散[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3):786-791.
- [46] 刘华丽,曹秀云,宋春雷,等. 水产养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(6): 130-134.
- [47] RAM N M, ZUR O, AVNIMELECH Y. Microbial changes occurring at the sediment-water interface in an intensively stocked and fed fish pond[J]. *Aquaculture*, 1982, 27(1): 63-72.
- [48] 刘国才,李德尚,董双林,等. 对虾综合养殖生态系底泥细菌的数量动态[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1):138-140.
- [49] AVNIMELECH Y, RITVO G. Shrimp and fish pond soils: processes and management[J]. *Aquaculture*, 2003, 220(1): 549-567.
- [50] 王鸿泰,胡德高. 池塘中亚硝酸盐对草鱼种的毒害及防治[J]. *水产学报*, 1989, 13(3): 207-214.
- [51] 李纯厚,王学锋,王晓伟,等. 中国海水养殖环境质量及其生态修复技术研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25:310-315.
- [52] 李 建,姜令绪,王文琪,等. 氨氮和硫化氢对日本对虾幼体的毒性影响[J]. *上海水产大学学报*, 2007, 16(1):22-27.
- [53] 叶 俊. 亚硝酸盐急性胁迫对草鱼血液生理生化指标和非特异性免疫性能的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [54] 龚志军,谢 平,唐汇涓,等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2001, 25(3): 210-216.
- [55] 尚媛媛,潘 纲,代立春,等. 改性当地土壤技术修复富营养化水体综合效果研究: II. 底栖动物群落结构和多样性的响应[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1):9-15.
- [56] MARINHO-SORIANO E, NUNES S O, CARNEIRO M A A, et al. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the macroalgae *Gracilaria birdiae*[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(2): 327-331.
- [57] 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, 395(10):46-47.
- [58] BOLEY A, MÜLLER W R, HAIDER G. Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 22(1): 75-85.
- [59] KIOUSSIS D R, WHEATON F W, KOFINAS P. Reactive nitrogen and phosphorus removal from aquaculture wastewater effluents using polymer hydrogels[J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 23(4): 315-332.
- [60] 吴 伟,胡庚东,金兰仙,等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(9):791-795.
- [61] 李 今,吕 田,华江环. 人工浮床水培空心菜生长特性及其在养殖废水净化中的应用[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2014, 37(2):22-27.
- [62] 廖 杰,徐熙安,刘玉洪,等. 水生植物滤床深度处理养殖废水过程中抗生素与抗性基因的响应研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8):2464-2470.
- [63] 吴 伟,陈家长,胡庚东,等. 利用人工基质构建固定化微生物膜对池塘养殖水体的原位修复[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1501-1507.
- [64] 陈重军,张 蕊,向 坤,等. 生物过滤和蔬菜浮床组合系统对温室甲鱼废水的处理效果[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2390-2396.
- [65] 谢小龙,吴振斌,徐 栋,等. 复合垂直流人工湿地处理养殖废水的 TSS 动态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 312-317.
- [66] 苗 莹,沈志强,周岳溪,等. 功能分区型人工湿地处理养殖废水厌氧消化液的性能[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(7):1075-1082.
- [67] SUMMERFELT S T, ADLER P R, GLENN D M, et al. Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands[J]. *Aquacultural Engineering*, 1999, 19(2): 81-92.
- [68] 陈春云,庄源益,方圣琼. 小球藻对养殖废水中 N、P 的去除研究[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(1):9-11.
- [69] 龚宏伟,徐盘英,贾文方,等. 循环水养蟹之尾水净化技术初探[J]. *水产养殖*, 2010, 31(2):1-3.
- [70] 张少军,周 毅,张延青,等. 滤食性双壳贝类对工厂化养殖废水中悬浮物的生物滤除研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2):363-367.
- [71] 贾建三. 全球水产养殖发展:现状、趋势和挑战[R]. 厦门:2016 全球水产养殖论坛,2016.
- [72] 于康震. 于康震副部长在全国渔业渔政工作会议上的讲话[EB/OL]. (2017-01-18) [2017-05-08]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201701/t20170122_5462231.htm.
- [73] 周恩来. 开创中国水产养殖业新时代——低碳高效池塘循环流水养鱼技术[R]. 厦门:全球水产养殖论坛,2016.

(责任编辑:王 妮)