

DOI: 10.5846/stxb201303220486

冯金飞, 李凤博, 吴殿星, 方福平. 稻作系统对淡水养殖池塘富营养化的修复效应及应用前景. 生态学报, 2014, 34(16): 4480-4487.

Feng J F, Li F B, Wu D X, Fang F P. Effects of rice cropping systems on the restoration of aquaculture pond eutrophication and its prospective application. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4480-4487.

稻作系统对淡水养殖池塘富营养化的 修复效应及应用前景

冯金飞¹, 李凤博¹, 吴殿星², 方福平^{1,*}

(1. 中国水稻研究所, 杭州 310006; 2. 浙江大学原子核农业科学研究所, 杭州 310029)

摘要: 养殖池塘富营养化是目前制约我国淡水养殖业可持续发展的关键因素。稻作系统具有显著的净化水质能力, 如何将稻作系统和淡水养殖系统进行生态耦合实现氮、磷养分的循环利用, 是淡水养殖池塘富营养化生态修复的一个重要研究方向。通过文献调研和实地考察, 综合分析了浮床种稻-原位修复、稻田湿地-异位修复、稻鱼生态种养 3 种耦合方式对养殖池塘富营养化的修复效应, 以及氮、磷养分综合利用效率, 归纳总结了不同模式的技术特点以及应用中存在的问题, 并就修复技术研究和生态补偿提出了培育生态修复专用水稻品种, 加强稻作系统生态修复理论研究和推广应用, 建立养殖池塘富营养化修复的生态补偿机制等建议。

关键词: 稻作系统; 池塘养殖; 富营养化; 生态修复

Effects of rice cropping systems on the restoration of aquaculture pond eutrophication and its prospective application

FENG Jinfei¹, LI Fengbo¹, WU Dianxing², FANG Fuping^{1,*}

1 China National Rice Research Institution, Hangzhou 310006, China

2 Institute of Nuclear Agricultural Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

Abstract: Pond culture, the area of which reached 2.37 million ha in 2010 and provided more than 70% of the freshwater aquaculture product in China, has become increasingly important in aquaculture in the last ten years. In order to achieve higher product yields, intensive culture of food fish has been widely employed in pond culture. However, overfeeding of bait in the intensive culture system has caused serious eutrophication problems (such as nitrogen and phosphorus enrichment) in the sediment and water in these ponds, which has become an important obstacle for the sustainable development of pond aquaculture. The rice cropping system has a significant capacity for water purification by rice plant accumulation, paddy soil adsorption and microbial degradation. Therefore, coupling of the rice cropping system and pond culture system could have great potential for ecological restoration of aquaculture pond eutrophication. With a summary of related research and field surveys, this paper comprehensively analyzed the effects of three coupled modes (floating-bed rice planting system, artificially constructed rice paddy wetland system and rice-fish system) on the restoration of aquaculture pond eutrophication and the use efficiency of nitrogen and phosphorus, and conclusions were drawn regarding the technical characteristics and problems in the application of these three coupled modes. The floating-bed rice planting system is an in situ remediation technology where rice was planted in a floating-bed in the pond as the phytoremediation plant and the nutrients were removed directly by the floating-bed system, mainly through accumulation by the rice plant and to a lesser extent adsorption

基金项目: 国家自然科学基金(70973143); 浙江省自然科学基金(Y5110259)

收稿日期: 2013-03-22; **修订日期:** 2014-06-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangfuping1971@163.com

by the floating-bed. Field studies had reported that nitrogen and phosphorus in pond water could be reduced by 29.0%—90.3% and 32.1%—49.1%, respectively, depending on the coverage area of the floating-bed and the nutrient content in the pond water. Whether the floating-bed rice planting system had a significant effect on the removal of nutrients in pond sediment is still unknown. The artificially constructed rice paddy wetland system is an ex situ restoration technology. The aquaculture water was firstly pumped from the pond to the artificially constructed rice paddy wetland, which removed the excess nutrients in the pond water by rice plant accumulation and paddy soil adsorption; the purified water was then pumped back to the pond. The nitrogen and phosphorus content in pumped pond water could be reduced by 65.2% and 72.0%, respectively, through the restoration of rice paddy wetland. Irrigation, fertilization and leakage affected the remediation effect of rice paddy wetland. However, there is a secondary pollution risk that pesticide used in rice paddy wetland may be left in pumped back water and have a toxic effect on the fish. Additionally, the eutrophic runoff from the rice paddy wetland during the rainy season would contaminate nearby water. The rice-fish system is an ecological rice-fish co-culture model. Compared to pond culture, rice-fish co-culture could reduce the bait feed and nutrient enrichment risk by the mutually beneficial relationship of fish and rice. Replacing the pond culture mode with rice-fish co-culture would greatly decrease the aquaculture water pollution risk. However, the area of rice-fish co-culture has increased slowly due to the lower economic benefit and higher labour density relative to other modes. Based on these analyses, this paper further proposed that more attention should be paid to research on special rice varieties for phytoremediation, restoration mechanism investigation and technology application, and the construction of ecological compensation mechanisms for the ecological restoration of aquaculture pond eutrophication.

Key Words: Rice cropping system; aquaculture pond; eutrophication; ecological restoration

我国淡水池塘养殖迅猛发展,在淡水水产养殖中的地位日益重要。据统计,2010 年我国淡水池塘养殖面积已达到 237.7 万 hm^2 ,占淡水养殖面积的 43%;池塘养殖水产品产量达 1647 万 t,占淡水养殖总产量的 70%^[1]。为了提高水产品产量,目前我国淡水养殖普遍采用高密度集约化养殖模式,存在过量放养、饵料过剩等突出问题,导致养殖塘水体富营养化问题十分严重。同时,养殖废水的排放也加剧了周边水体的富营养化程度,面源污染严重。因此,池塘养殖的水环境污染问题已成为当前淡水养殖发展的主要制约因素^[2]。20 世纪 90 年代以来,各国先后对淡水养殖水体环境修复进行了大量研究,并提出了相应的对策措施,主要有物理修复、化学修复和生物修复等技术模式。其中,人工湿地等生物修复技术由于修复成本低、能耗少、环境友好等特点而受到广泛关注^[3-5]。

稻田生态系统是我国重要的人工湿地,不仅承载着重要的粮食生产功能,而且在净化水质中也具有独特的作用^[6]。稻田湿地同时具有生物吸收分解污染物质的食物链系统、沉淀和吸附污染物的物理自净过程,以及氧化还原分解、固定污染物质的化学

净化作用,可以通过水稻的吸收、水稻土的吸附以及土壤微生物的降解等途径,来实现对水体中氮磷等营养物质以及重金属等污染物的去除^[7]。有研究表明,池塘养殖污水经稻田湿地修复后,污水中总磷含量降低 66.0%—69.3%,总氮含量降低 41.4%—42.5%,化学耗氧量降低 53.3%—54.8%^[8]。稻田湿地系统对城镇生活污水同样具有显著的净化能力。Li 等研究表明农村污水灌入稻田湿地生态系统后,对总氮和总磷的消纳分别达到 55.7%—69.3% 和 56.7%—71.4%^[9-10];陈兴华等研究发现经过稻田湿地修复可以使生活污水中的悬浮物降低 50%—70%,化学耗氧量降低 60%—80%,生物化学耗氧量降低 50%—90%,pH 值趋向中性^[11]。太湖地区多年监测结果也显示,从稻田湿地流出的径流水或排水中所含氮素一般都要低于进入稻田湿地的灌溉水和雨水,稻田湿地对水循环中养分的氮汇作用显著^[12]。可见,稻作系统对不同来源氮、磷等污染物具有较强的消纳能力,而且富集在水稻植株中的这些养分元素还可以通过秸秆还田等方式循环利用,是一种环境友好、生态健康、可持续利用的水质净化修复系统。

在我国南方水网农区,一方面淡水养殖发展迅速,传统的养殖模式使水体富营养化问题日益严重,给区域水体环境健康带来巨大威胁;另一方面,稻谷刚性需求逐年增加,耕地面积逐年减少,增加稻谷产量、保障口粮安全的压力越来越大。因此,如何将稻作系统和淡水养殖系统进行生态耦合,实现生态安全、水产养殖和粮食保障的多赢,从而促进养殖池塘的可持续发展,成为当前淡水养殖水体环境修复的一个重要研究方向。本文在系统总结国内外研究的基础上,深入讨论了稻作系统对淡水养殖池塘氮磷富集的修复效应,分析了不同修复模式的技术特点及应用前景,期望能为今后的研究提供理论参考。

1 淡水养殖池塘富营养化的成因及危害

淡水养殖池塘的富营养化主要是由于池塘生态系统中氮、磷等养分物质失衡引起的。在养殖池塘中,氮、磷等养分物质是影响初级生产力的关键因素。为了提高水产品产量,往往需要投入大量的饵料、肥料等,以保证氮、磷等养分物质的供给。除此之外,鱼苗投入、池塘灌水、降雨、微生物固氮等也会带入一部分氮、磷进入养殖池塘中。在养殖池塘中氮主要以铵态氮、亚硝态氮、硝态氮等无机氮以及氨基酸、蛋白质、腐殖酸等有机氮形式存在;磷主要以溶解无机磷、溶解有机磷、颗粒磷等形式存在。不同形态氮、磷的转化主要是受水产动物、浮游植物和微生物的吸收同化、硝化与反硝化、铵挥发以及吸附沉积等生物物理化学过程调控^[13-15]。即不同来源的氮、磷进入养殖池塘后,一部分被塘中鱼虾等水产动物以及浮游生物吸收同化;另一部分则以底泥沉积、换排水和渗漏、铵挥发等途径输出。表1列出了不同类型养殖塘的氮磷收支状况,从表中可以看出,饵料和肥料的投入在氮、磷的输入中所占比例最大,在大部分养殖塘中都占到氮、磷输入的80%以上,鱼苗投入、进水等其他途径输入的氮、磷所占比例相对较低。在氮、磷的输出中,不同类型养殖塘水产品收获输出的氮、磷存在较大差异,水产品收获输出的氮占总量的11.6%—49.2%,水产品收获输出的磷占总量的2.4%—48.4%,但均没有超过总量的一半。剩余的氮、磷大多沉积在底泥中,或通过排水、渗漏、铵挥发等途径进入养殖塘外部的水体或大气环境中。其中,底泥中沉积的氮、磷所占比例最高,大部分养殖

塘底泥中沉积的氮都超过了总量的50%,沉积的磷均超过了总量的40%;其次养殖塘排水中输出的氮、磷也占有较大比例。从这些结果可以看出,在养殖塘中,水产品吸收同化的氮、磷仅占饵料和肥料输入的一小部分,大量的氮、磷沉积在池塘底泥或随养殖废水排出,对养殖塘内或外界水体环境产生富营养化污染。

养殖池塘富营养化的危害主要体现在对养殖塘内部和外部水体的污染两个方面。养殖池塘富营养化,会导致塘内水体质量的恶化,抑制鱼虾的正常生长,甚至危及鱼虾的生存。池塘中大量的残饵和鱼虾的代谢产物经微生物的氨化作用转变成无机形态的氨氮,会导致水体中氨氮含量过高。Randall等^[22]研究表明水体中氨氮浓度过高会严重影响鱼虾体内酶的催化作用和细胞膜的稳定性,破坏鱼虾的排泄系统和渗透系统,导致鱼虾失去平衡,无生气或昏迷等。氨氮在水体中还可通过亚硝化细菌和硝化细菌的作用,氧化成亚硝酸盐和硝酸盐。水体中亚硝酸盐过高会导致鱼虾体内血液中的亚铁血红蛋白被氧化成高铁血红蛋白,导致血液中氧气含量降低,从而造成鱼虾死亡^[23]。此外,养殖塘氮、磷养分富集还会导致塘内有害藻类爆发性生长,水体溶氧量降低,导致鱼虾死亡。除了对塘内水质的影响之外,养殖塘排出的废水还会对周边水体环境产生污染。如王洪起对于桥水库和周边养殖塘水质的监测发现,水库周边养殖塘水体的氮、磷含量明显高于水库,在夏秋季节和捕鱼时,富含氮、磷的鱼塘废水被直接或间接排入水库,在水库周边形成明显的污染带^[24]。太湖地区主要水产养殖模式氮、磷损失的研究表明,不同模式下池塘每年向周围水体排出的氮、磷量分别为21.96—73.54 kg/hm²和1.99—6.55 kg/hm²^[25]。第一次全国污染普查公报数据也显示,我国水产养殖业排放的总氮和总磷分别达到8.21万t和1.56万t。养殖废水富营养化对周边水体环境的污染不容忽视。

2 稻作系统对养殖池塘富营养化的修复效应

目前,采用稻作系统修复淡水养殖池塘富营养化主要有三类技术耦合模式:一是浮床种稻-原位修复模式,即在养殖塘中利用浮床种稻实现对水质的净化作用;二是稻田湿地-异位修复模式,即将养殖

表 1 不同类型淡水养殖池塘的氮、磷收支

Table 1 Nitrogen and phosphorus budgets in different aquaculture ponds

养分收支 Nutrients budgets	养殖类型 Culture types	输入 Input				输出 Output				参考文献 Reference		
		饵料、肥料 Feed and fertilization	鱼苗投放 Fish stocked	进水 Inflow	降雨 Rainfall	其他 Others	产品收获 Fish harvested	底泥沉积 Sediment accumulation	排水 Outflow		渗漏 Seepage	其他 Others
氮收支/% Nitrogen budgets	草、鲢等混养	91	—	9	—	—	20	63.2	15.2	—	—	[16]
	罗非鱼	94.1	2.2	3.1	0.6	—	20.1	69.6	7.3	3.0	—	[17]
	鲢鱼等混养	83.8	15.7	0.3	0.1	—	49.2	10.6	1.7	0.1	38.4 ^a	[18]
	中国对虾	70.6	<0.1	10.6	0.2	18.6	23.8	50.4	23.1	2.7	<0.1	[19]
	南美白对虾	85.8	<0.1	14.2	—	—	27.2	53.7	19.1	—	—	[20]
磷收支/% Phosphorus budgets	河蟹	98.9	1.1	—	—	—	11.6	28.9	10.0	—	49.5 ^b	[21]
	草、鲢等混养	91.5	—	8	0.2	—	45.2	49.4	5.3	—	—	[16]
	罗非鱼	94.9	1.5	3.4	0.2	—	16.7	40.4	29.4	13.6	—	[17]
	鲢鱼等混养	81.0	18.3	0.3	<0.1	—	48.4	41.9	0.9	0.1	—	[18]
	中国对虾	83.8	<0.1	1.7	<0.1	14.5	10.9	79.9	8.2	0.9	<0.1	[19]
	南美白对虾	61.9	<0.1	38.1	—	—	13.6	44.7	41.8	—	—	[20]
	河蟹	99.6	0.4	—	—	—	2.4	68.4	4.6	—	24.5	[21]

a 铵挥发和反硝化损失;b 伊乐藻吸收

废水引出,灌入构建的稻田人工湿地生态系统中对其进行净化后再循环利用。三是转变水产养殖模式,将单一的水产养殖模式转变为稻鱼生态种养模式,以减少饵料、肥料投入,提高氮、磷养分综合利用率,减少水产养殖过程中养分物质的排放。

2.1 浮床种稻-原位修复

浮床种稻对富营养化水质的修复机制主要有三个方面:一是通过水稻生长对水体中氮、磷的吸收利用,直接将水体中的无机营养物带出水体;二是利用植物根系和浮床基质等对水体中悬浮物的吸附作用,富集水体中的悬浮物;三是通过根际泌氧功能改善水体微环境,使根区形成好氧环境,促进有机物质分解和硝化细菌的生长,促进好氧转化,利于养分转化吸收。对水体的净化效果受到浮床覆盖率、水稻生物量、根系的发达程度、输氧能力、污水中氮、磷含量等因素影响,覆盖率越高、生物量越大、根系输氧能力越强,氮、磷的去除效果就越好。采用浮床种稻净化水质的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代,宋祥甫等研究了不同覆盖率浮床种稻对富营养化水体中氮磷的去除效果,结果表明,在 20%、40% 和 60% 浮床覆盖率下,通过分蘖到成熟 84d 处理,全池水体中总氮的去除率分别为 29.0%、49.8% 和 58.7%,总磷的去除率分别为 32.1%、42.9% 和 49.1%。随着覆盖率增加,对水体氮、磷的去除率也不断提高^[26]。马克星等利用浮床种稻净化农田退水水质的研究结果也显示,浮床种稻系统对总氮的去除率可以达到 90.3%^[27]。卢进登等比较了水稻、芦苇、香蒲等不同水生植物的对富营养化的净化效果,在 2 个月的生育期内,水稻氮磷的吸收量分别为 118.7 g/m² 和 11.1 g/m²,仅次于芦苇和荻,明显高于牛筋草、香蒲、美人蕉等植物^[28]。可见,利用浮床种植水稻对富营养化水体中的氮、磷具有较强的净化能力。

浮床种稻-原位修复模式的特点是将大田种植的粮食作物-水稻进行浮床水生漂浮种植,充分利用水稻植株根系发达、生物量大、养分吸收和转运能力强等特点,可以大量吸收和富集水体中的氮、磷等养分元素,降低水体中养分元素含量;既可以净化水体,又可以实现养分物质的循环利用。该技术模式还具有充分利用水面而无需占用土地,能够适应较宽的水深范围,运行管理相对容易,美化养殖塘水体景观等优点。而且,水稻是重要的粮食作物,浮床种

植的水稻收获后还可以创造一定的经济效益,不存在修复植物收获后难以二次利用的问题。然而,在养殖池塘中,氮、磷等养分物质不仅富集在水体中,而且还大量沉积在底泥中。以往研究主要关注浮床种植水稻对水体中氮、磷含量的净化效应,而对底泥中氮磷的净化效应研究则较少。浮床种植水稻可以降低水体中氮、磷浓度,调节水体溶解氧含量以及 pH 值等水体理化性质,这些因素的改变可能会影响底泥中氮、磷向水体的扩散过程^[29-30]。但是目前还不明确浮床种植水稻是否对底泥中氮、磷养分也具有显著的净化效应。

2.2 稻田湿地-异位修复

稻田湿地-异位修复是将富含氮、磷的养殖废水转入稻田湿地进行修复的一种技术模式。稻田湿地主要是通过水稻的吸收、水稻土的吸附及稻田土壤微生物的降解来去除废水中的氮、磷养分物质。稻田湿地除氮的过程主要是微生物的硝化和反硝化作用、植物吸收及氨挥发;除磷的过程主要包括微生物降解增加植物吸收、植物根系吸附、底泥吸附和还原态时少量磷的挥发等。研究表明,稻田湿地对养殖塘废水中的氮、磷具有显著的净化效果,养殖塘废水经稻田湿地净化后,其总氮、总磷、硝态氮和铵态氮含量分别降低 65.2%、72.0%、87.3% 和 66.8%^[31]。稻田湿地的灌溉方式会影响净化效果,平衡灌排方式下养殖废水氮、磷的去除率要低于间隙灌排方式和间隙灌溉连续排水方式^[32]。在稻田湿地中,养殖废水提供的氮、磷养分并不能完全满足水稻的生长需要,需要补施适量肥料才能保证水稻产量。适当增施肥料并不降低稻田湿地对养殖废水的净化效果^[8]。在人工构造的稻田湿地中,渗径也会影响稻田湿地对养殖废水的净化效果,当渗径增加到 50 cm 时,硝态氮和化学耗氧量的去除率则明显优于 30 cm 渗径^[31]。

稻田湿地是世界上最大的人工湿地,为富营养化水质的生态修复提供了丰富的湿地资源。稻田湿地在氮磷去除方面具有独特的特点:一是富营养化废水为水稻生长提供必须元素,可节约化肥、水的投入,水稻收获可以创造一定的经济效益,生态效应和经济效益显著;二是水稻吸收的氮磷养分可通过秸秆还田等方式实现养分元素的二次循环利用;三是稻田湿地生态系统在净化水质的同时,还可以起到

防洪减灾、减少空气浮尘、保护农业耕地、降低农业成本、发展旅游休闲的效果和作用。但是,稻田湿地系统除了具有吸纳、降解不同来源的氮磷和有机物等污染,起到汇的作用外,在雨季稻田湿地还会产生一定的径流,成为富营养化的源;稻田湿地本质上属于稻作生态系统,在水稻生长过程中需要针对病虫害危害而喷洒农药,从而造成农药对净化水体的污染,即稻田湿地系统在处理富营养化废水过程中存在二次污染的风险,需要提高水稻品种的抗病虫能力和生物农药的应用,加强工程和农艺等管理措施,减少径流。此外,养殖废水仅靠灌入周边稻田湿地进行净化,受养殖池塘和稻田分布的限制。

2.3 稻鱼生态种养

稻鱼生态种养模式是通过改变水产养殖方式,以稻田湿地为养殖水体,将水产养殖与水稻种植有机结合起来,通过充分利用鱼-稻的生态互惠作用,来减少饵料、肥料等养殖、种植物料的投入,从而减少水产养殖和水稻种植对水体环境的氮、磷等养分物质排放,减少水体污染风险。大田试验表明,在相同养殖密度下,稻鱼共作系统水体氨氮含量要比鱼单作系统低 24.5%,总磷含量低 32.6%,稻鱼共作系统氮、磷利用效率高于鱼单作系统,稻鱼共作系统能够减少水产养殖带来的养分流失^[33]。与常规稻作相比,稻鱼共生系统的硝态氮淋溶量、氧化亚氮排放和铵挥发也有所降低^[34]。在稻鱼共生系统中,一方面,稻田大部分杂草、水体中的大量浮游生物和细菌、以及部分有机物腐屑都是鱼等水生经济动物很好的天然饵料,可以直接被鱼摄食,从而可以不投或仅投放少量饵料就可以满足鱼的食物需求,而且残余饵料或鱼的排泄物降解产生的氮、磷等养分物质会被水稻吸收,从而减少养分的流失^[35]。另一方面,稻田中鱼、虾等水生动物的不间断活动产生中耕混水效果,促进土壤中养分物质的释放,促进水稻生长。以往研究发现,稻鱼共作系统水稻生物量和氮储量均高于水稻单作^[36]。

稻鱼生态种养模式虽然不是直接对养殖水体进行修复,但是可以作为一种生态养殖模式来部分替代对水体污染重的集约化养殖方式,从而减轻水产品养殖产业对水体的污染风险。近 30 年来,我国稻田水产养殖发展迅速,稻田养殖的水产品逐渐由鲤、草等普通鱼类扩展到虾、蟹、中华鳖等特种水产。稻

田水产养殖规模也在不断扩大,到 2010 年,我国稻田水产养殖面积已达到 132.6 万 hm^2 ,年水产品产量已达到 124.3 万 t。但是目前我国稻田水产养殖在规模化和综合化发展中还存在一些问题,影响了稻田水产养殖的推广。例如,稻田水产养殖需要连片作业、规模化生产、产业化经营,才能提高综合生产能力,提高经济和生态效益。但目前农村一家一户小生产的经营体制,种养规模小,缺乏必要的资金和技术支撑;稻田水产养殖缺乏配套的农机设备,机械化程度低,劳动强度大,用工量多。由于社会经济的迅速发展,大量农村劳动力向城市第二、三产业转移,农村劳动力的缺乏也限制了稻田水产养殖的推广和规模化发展^[37-38]。此外,稻田养殖因需要开挖环形沟、蓄水鱼池,一定程度上减少了稻田面积,不利于水稻增产。

3 研究展望

浮床种稻原位修复、稻田湿地异位修复和稻鱼生态种养这 3 种模式都可以有效的净化或减少淡水养殖水体中氮磷等养分物质,实现养分的循环利用,减轻水产养殖对水体的污染。此外,水稻收获还能产生一定的经济效益。在我国南方水网农区,采用稻作系统来修复养殖水体的富营养化问题具有十分广阔的应用前景。但是,上述 3 种修复模式也还存在一些不足,影响了大范围的推广应用。例如,浮床消耗材料多且材料成本高、操作困难,而且浮床种稻根系难以深入到底泥,对底泥中氮、磷的富集修复效果差等;稻田湿地系统修复养殖废水受养殖池塘和稻田空间分布的限制;“水稻+水产”生态种养模式存在不易规模化发展、不利稻谷增产等问题。因此,急需在理论与技术研究资助、生态补偿以及农户激励等方面给予政策支持。

(1) 加强生态修复专用水稻品种的培育。在以往的研究和修复实践中,一般都是采用大田生产中的常规水稻品种,主要针对养殖塘水体中氮、磷养分富集的净化。但是在养殖池塘,底泥中沉积的养分物质要远大于水体,并且会不断向上层水体释放。因此,在以后的研究中,应专门针对养殖池塘中氮、磷等养分物质的富集特征,培育生物量大、对氮、磷等养分物质富集能力强、抗性好、产量高、品质优以及可以直接种植养殖塘中深水稻品种,以加强对养

殖塘底泥富营养化的修复。

(2) 加强稻作系统生态修复的理论研究和推广应用。从现有文献看, 稻作系统对养殖塘水体修复主要通过增加氮、磷等养分的转运输出, 以及改良池塘水体、底泥的生物物理化学环境等两方面。但是, 目前对这两方面作用机制的研究还非常有限。因此, 还需要加强稻作系统生态修复机制的研究, 以期进一步明确稻作系统对养殖池塘氮、磷等养分循环的直接和间接影响, 最终实现稻作系统和养殖池塘系统的最优生态耦合。同时, 加强对稻-鱼共生系统中水稻与鱼的生物配置、水稻的空间布局、肥料和饵料的投入、池塘水的管理等技术环节的研究, 构建以生态修复为核心的“水产-水稻”复合养种技术体系, 并在池塘养殖典型地区进行技术示范和推广应用。

(3) 建立稻作系统生态修复的生态补偿机制。采用稻作系统修复养殖池塘富营养化不仅生态环境效益显著, 而且还能促进农业增效与农民增收。稻作系统与水产养殖系统的生态耦合, 是集生态、社会和经济三大效益于一体的生态种养技术体系。因此, 政府部门应建立适当的生态补偿机制, 对实现这些修复技术的生产单位和农户进行补贴; 跟踪监测修复技术的生态效应, 综合评价不同技术模式对氮、磷等养分物质的减排效果以及综合利用效率, 确定补贴标准。同时, 对应用这些修复技术的生产单位和农户, 在土地流转、技术服务以及产业化经营等方面给予相应的政策支持。

References:

- [1] Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook 2011. Beijing: China Agriculture Press.
- [2] Cao L, Wang W M, Yang Y, Yang C T, Yuan Z H, Xiong S B, Diana J. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research-International*, 2007, 14(7): 452-462.
- [3] Song C, Chen J C, Qiu L P, Meng S L, Fan L M, Hu G D. Ecological remediation technologies for China's freshwater aquaculture pond environment: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2425-2430.
- [4] Chávez-Crooker P, Obregón-Contreras J. Bioremediation of aquaculture wastes. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(3): 313-317.
- [5] Pu P M, Li Z K, Cheng X Y, Pu J P. Key technology & strategy for optimizing water environments in lake catchments from point of view of substance circulation and balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 5088-5097.
- [6] Li F B, Xu C C, Zhou X Y, Fang F P. On theory and model of eco-compensation for paddy field. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(1): 102-105.
- [7] Li S. Study on Nitrogen and Phosphorus Removal of Rural Domestic Wastewater and Its Runoff in the Paddy Wetlands [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [8] Chen B X. Study on Rice Field for the Treatment of Pond Effluents [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [9] Li S, Li H, Liang X Q, Chen Y X, Cao Z H, Xu Z H. Rural wastewater irrigation and nitrogen removal by the paddy wetland system in the Tai Lake region of China. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(5): 433-442.
- [10] Li S, Li H, Liang X Q, Chen Y X, Wang S X, Wang F E. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/3): 301-308.
- [11] Chen X H, Wang F C, Yang S G, Zhang W T, Yang C Y. The application of north part high and cold small town comprehensive sewage treatment with artificial-rice field system. *Inner Mongolia Environmental Science*, 2008, 20(1): 79-82.
- [12] Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, Hu Z Y, Dong Y H, Yin R. Ecological function of "paddy field ring" to urban and rural environment II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 255-260.
- [13] Wen Z L. Impact of intensive fresh water aquaculture on water environment and its countermeasures. *Inner Mongolia Water Resources*, 2008, (4): 138-139.
- [14] Hargreaves J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 1998, 166(3/4): 181-212.
- [15] Zhou Y H. Research on Dynamic of Phosphorous Concentration in Aquaculture Water [D]. Guangzhou: Sun Yatsen University, 2005.
- [16] Liu X G. Study on the Pond Aquaculture Pollution and Ecological Engineering Regulation Techniques [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [17] Green B W, Boyd C E. Chemical budgets for organically-fertilized fish ponds in the dry tropics. *Journal of World Aquaculture Society*, 1995, 26(3): 284-296.
- [18] Brown T W, Boyd C E, Chappell J A. Approximate water and chemical budgets for an experimental in-pond raceway system. *Journal of World Agriculture Society*, 2012, 43(4): 526-537.
- [19] Li Z J, Yu W, Zhu C B, Wen G L, Ma G Z. Study on nitrogen and phosphorus budgets of experimental enclosures with shrimp monoculture and shrimp-tilapia polyculture. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(4): 50-55.
- [20] Casillas-Hernández R, Magallón-Barajas F, Portillo-Clarck G, Pérez-Osuna, F. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: trays and mechanical dispersal. *Aquaculture*, 2006, 258(1/4): 289-298.
- [21] Dai X Y, Cai C F, Xu S B, Shi C J, Lü M L, Ye Y T. Effects of food composition on nitrogen and phosphorous budgets and pollution intensity in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) culture pond. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(3): 52-56.
- [22] Randall D J, Tsui T K N. Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45(1/12): 17-23.

- [23] Kroupova H, Machova J, Svobodova Z. Nitrite influence on fish: a review. *Veterinari Medicina*, 2005, 50(11): 461-471.
- [24] Wang H Q. Water quality protection and aquaculture in Yuqiao reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(4): 379-384.
- [25] Yang L Z, Wang D J, Xia L Z. Features and ways of control of Non-point Agricultural Pollution in Taihu Area. *China Water Resources*, 2004, (20): 29-30.
- [26] Song X F, Zhou G Y, Wu W M, Jin Q Y, Ying H D. Study on the removal effect and regulation of rice plants on floating-beds to main nutrients N and P in eutrophicated water bodies. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 489-494.
- [27] Ma K X, Wu H Q, Zhu D H, Mu X. Purification of irrigation return flow by cultivating rice on water surface in Ningxia irrigation area. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(4): 103-106.
- [28] Lu J D, Chen H B, Zhao L Y, Li Z H. Study on the growth characteristics of seven plants cultivated on artificial floating rafts in eutrophic water. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*. 2006, 7(7): 58-61.
- [29] Nowlin W H, Evarts J L, Vanni M J. Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, 2005, 50(2): 301-322.
- [30] Sun Y. Field determination of diffusion flux of nutrients from sediment-water interface of culture pond. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6): 664-666.
- [31] Zhou Y, Zhu J Q, Li G, Wu Q X. The nutrients in the fertile water from fish pond assimilated and utilized by paddy field. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(5): 78-81.
- [32] Wu Q X, Zhu J Q, Li G, Zhou Y. Purification effect of paddy field on fertile water from fish pond under different water management modes. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(4): 5-9.
- [33] Wu X. The Utilization of Nutrients in Traditional Rice-Fish Co-Culture System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [34] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhan M, Yuan W L, Ahmad S. Nitrogen losses from integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in southern China. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 207-217.
- [35] Frei M, Becker K. Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources. *Natural Resources Forum*, 2005, 29(2): 135-143.
- [36] Vromant N, Chau N H, Ollevier F. The effect of rice seeding rate and fish stocking on the floodwater ecology of the rice field in direct-seeded, concurrent rice-fish systems. *Hydrobiologia*, 2001, 445(1/3): 105-117.
- [37] Wang W. Current situation and development countermeasure of rice-fish co-culture in China. *China Fisheries*, 2011, (11): 43-48.
- [38] Xu H X. Development countermeasure of rice-fish co-culture in Northern China. *Rural Economy and Science-technology*, 2012, 23(10): 154-155.
- [5] 濮培民, 李正魁, 成小英, 濮江平. 优化湖泊流域水环境的对策与关键技术——从物质循环及平衡观点看. *生态学报*, 2009, 29(9): 5088-5097.
- [6] 李凤博, 徐春春, 周锡跃, 方福平. 稻田生态补偿理论与模式研究. *农业现代化研究*, 2009, 30(1): 102-105.
- [7] 李松. 稻田湿地处理农村生活污水脱氮除磷及其径流试验研究. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [8] 陈柏湘. 稻田对池塘养殖废水的净化研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [11] 陈兴华, 王方成, 杨树果, 张伟涛, 杨驰原. 应用人工湿地稻田系统处理北部高寒地区小城镇综合污水. *内蒙古环境科学*, 2008, 20(1): 79-82.
- [12] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 胡正义, 董元华, 尹睿. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义. *土壤学报*, 2006, 43(2): 255-260.
- [13] 温志良. 集约化淡水养殖对水环境的影响与对策. *内蒙古水利*, 2008, (4): 138-139.
- [15] 周艳红. 养殖水体磷的动态变化研究 [D]. 广州: 中山大学, 2005.
- [16] 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.
- [19] 李卓佳, 虞为, 朱长波, 文国樑, 马广智. 对虾单养和对虾-罗非鱼混养试验围隔氮磷收支的研究. *安全与环境学报*, 2012, 12(4): 50-55.
- [21] 戴修赢, 蔡春芳, 徐升宝, 施陈江, 吕梅良, 叶元土. 饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷收支和污染强度的影响. *水生生态学杂志*, 2010, 3(3): 52-56.
- [24] 王洪起. 于桥水库的水质保护与渔业生产. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 379-384.
- [25] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径. *中国水利*, 2004, (20): 29-30.
- [26] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 金千瑜, 应火冬. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 489-494.
- [27] 马克星, 吴海卿, 朱东海, 穆鑫. 宁夏灌区水面植稻净化农田退水效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 103-106.
- [28] 卢进登, 陈红兵, 赵丽娅, 李兆华. 人工浮床栽培 7 种植物在富营养化水体中的生长特性研究. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(7): 58-61.
- [30] 孙耀. 池塘养殖环境中底质-水界面营养盐扩散通量的现场测定. *生态学报*, 1996, 16(6): 664-666.
- [31] 周元, 朱建强, 李谷, 吴启侠. 稻田对池塘养殖肥水的吸收利用效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(5): 78-81.
- [32] 吴启侠, 朱建强, 李谷, 周元. 不同水管理模式下稻田对养殖肥水的净化效果研究. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 5-9.
- [33] 吴雪. 稻鱼系统养分循环利用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [37] 王武. 我国稻田种养技术的现状与发展对策研究. *中国水产*, 2011, (11): 43-48.
- [38] 徐红霞. 北方稻田综合种养技术发展对策研究. *农村经济与科技*, 2012, 23(10): 154-155.

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 2011 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社.
- [3] 宋超, 陈家长, 裴丽萍, 孟顺龙, 范立民, 胡庚东. 中国淡水