

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

张秋卓, 李 华, 王 娟, 徐亚同

(华东师范大学资源与环境科学学院/上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘 要:以上海市松江五厍生态农业园区水产养殖排水为研究对象,在调查试验区域内水产养殖情况及排换水情况的基础上,结合农业园区自身特点,开展水生植物组合净化示范工程建设。在示范工程运行一段时间后对其运行效果进行评估,结果表明,试验区域水产养殖排水水质得到了一定的改善,其对 COD_Cr 、TN 及 TP 的去除率分别可达 73.5%、24.9% 及 67.4%。通过比较组合技术与单项技术对水质净化效果的影响可知,水生植物组合净化技术对养殖水体的净化效果要优于单项技术的水质净化效果,组合技术比水生经济作物浮床单项技术对 TN、TP、亚硝态氮和 COD_Cr 去除率平均分别提高了 13.7%、40.1%、78.7% 及 114.4%。此外,对水生经济作物浮床上的空心菜定期收割,共收获 11 907 kg,可获得一定的经济收益。将空心菜移植于螃蟹塘,不仅可供螃蟹食用,还可净化螃蟹塘的水质,有利于维持养殖系统的生物多样性,符合循环生态农业的生产模式。

关键词:水产养殖排水;水质改善;生态农业园区;水生经济作物浮床

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)06-1253-08 **doi:**10.11654/jaes.2013.06.024

Aquaculture Water Quality Improvement by Ecological Remediation Integration Technology in Ecological Agriculture District

ZHANG Qiu-zhuo, LI Hua, WANG Juan, XU Ya-tong

(College of Resources and Environmental Science, East China Normal University/Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China)

Abstract: The current ecological situation of aquaculture water quality in Wushe (Songjiang District, Shanghai City) district is not upto mark. In the present study, characteristics and basic information of ecological agricultural park were first investigated. Ecological remediation integration technology, including aquatic plant purification and aquatic economic crops floating bed were used to improve the aquaculture water quality in this district. After operating for a period of defined time, effect of the integration technology on quality improvement of aquaculture water was estimated. The results showed significant improvement in the aquaculture water quality at experimental site with removal rates of COD_Cr , TN and TP were 73.5%, 24.9% and 67.4%, respectively. In addition, the purification effects of ecological remediation integration technology and individual technology were compared. The results indicated that the integration technology was better than individual technology, as removed TN, TP, Nitrite nitrogen and COD_Cr at the rate of 13.7%, 40.1%, 78.7% and 114.4%, respectively, higher than that of individual technology. In addition, water spinach which was grown on aquatic economic crops floating bed was harvested at regular time intervals. The total harvest weight of water spinach was 11 907 kg, which could achieve good economic benefits. A small parts of the water spinach were transplanted to crab ponds. The transplanted water spinach could not only serve as food source for crab, but also purify the water quality in crab ponds, which could maintain the biological diversity in aquacultural ponds and coincidence with production mode of circulation ecological agriculture.

Keywords: aquaculture water; water quality improvement; ecological agriculture district; aquatic economic crops floating bed

收稿日期:2012-12-01

基金项目:上海市科委重大科技专项(08dz1900407);上海市自然科学基金面上项目(12ZR1409100);国家高等学校博士点基金(20120076120019);上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放课题(SHUES2011B01)

作者简介:张秋卓(1982—),女,山东淄博人,博士,副教授,主要从事水环境生态修复、生物质能源等方面的研究工作。

E-mail:zhangqiuzhuo@126.com

我国是水产养殖大国,水产养殖产量多年居世界首位^[1]。上海市地处长江出口,面临东黄海、西依大陆,对发展渔业亦属得天独厚。据统计,2009年上海市水产品总产量为338 574 t,捕捞产品153 151 t,养殖产品200 388 t^[2]。然而,随着集约化水产养殖模式的迅猛发展,水质恶化和废水排放直接制约了养殖产业的可持续发展。养殖过程中饵料的排放、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,导致养殖水域环境恶化,生态系统失衡,病害滋生,加剧了水体的富营养化程度^[3-4]。在确保水产养殖业发展的同时降低养殖废水对周边环境的污染,是确保水产养殖业可持续发展的必然要求。

目前,世界各国对水产养殖排水的净化技术及措施均开展了广泛研究^[5-7],主要包括利用机械过滤处理的物理方法^[8]、利用臭氧净化^[9]及电化学方法处理^[10]等的化学方法、利用生物膜法^[11-12,7]、藻类^[4,13-14]、植物^[15]等处理的生物方法。与传统的物理修复和化学修复技术相比,由于生物修复技术具有费用低、不易产生二次污染、不危害养殖功能、不破坏生态平衡等诸多优点,因而得到了广泛认可。特别是将植物应用于水产养殖废水的处理,构建绿色水产养殖模式,一方面水产养殖废水为植物生长提供营养,另一方面植物又使水产养殖废水得到净化,符合现代水产养殖的需要^[16]。

松江五厍生态农业园区地处长江三角洲东南缘,太湖流域东部、上海黄浦江上游水资源保护区,为平原河网感潮区,受黄浦江潮汐的影响较大,区域总面积为11.19 km²。此园区于2001年2月正式成立,是上海市市级现代农业园区,国家级农业标准化生产示范基地区域。然而,目前在生态园区内未经处理的高负荷水产养殖排水构成了园区的主要污染来源,大部分养殖排水经外河道汇入黄浦江,造成水体富营养化及生物多样性减少。如何缓解水产养殖所带来的环境污染,因地制宜地构建绿色生态水产养殖模式,是农业生态园区亟待解决的问题。

1 材料与方法

1.1 示范工程地点的选择

选择上海市松江五厍农业生态园区养殖场排水河道作为研究对象,试验河道长600 m,宽6.5 m,平均水深1.2 m,在水产养殖高峰期水深可达到1.65 m;硬质水泥护岸,护岸斜面平均长为4 m,斜面坡度约45°。在每个养殖塘中均设有一个排水口,养殖排

水通过排水口直接排入河道。河道及其护岸原貌如图1所示。



图1 河道原貌

Figure 1 Original appearance of river

1.2 水产养殖排水水质净化示范工程建设

针对试验区域内养殖排水量大、水力负荷高等特点,并结合生态农业园区自身特点,采用水生植物组合净化技术对试验区域水产养殖排水进行净化。在高水力负荷、较短水力停留时间的情况下,先利用去污能力较强的凤眼莲作为先驱植物去除部分污染物,然后经水生经济作物浮床区进一步提高污染物的去除率,减轻养殖塘排换水对外河道污染的影响。在生态浮床上种植水生经济作物空心菜,还可获得一定的经济收益,构建绿色生态水产养殖模式,符合生态农业园区的理念。

将河道生态修复工程分为水生植物净化区与经济作物浮床区两个区段。

1.2.1 区段 I——水生植物净化区

区段 I 为水生植物净化区(图2),长100 m,面积约600 m²,种植去污能力较强的水生植物——凤眼莲(*Water hyacinth*)。凤眼莲植株须根发达,分蘖繁殖快,管理粗放,是净化水质的良好植物^[17-18]。由于凤眼莲的繁殖能力很强,用网从河底拦截,可防止凤眼莲的过度繁殖对区段 II 中水生经济作物生长的不良影响。



图2 水生植物净化区

Figure 2 Aquatic plants purification area

1.2.2 区段Ⅱ——经济作物浮床区

区段Ⅱ为经济作物浮床区,长 500 m,面积约 3000 m²,主要种植水生经济作物——空心菜(*Water spinach*)。经济作物浮床是在传统生态浮床上的改进,生态浮床的材料选用具有绿色环保的竹子扎成竹排,每个竹排长 3~3.5 m,宽 1~1.2 m,竹竿上每隔 15~20 cm 用塑料扎扣固定一个 PVC(32 mm×40 mm)。将空心菜放入 PVC 管中,进行整理和固定,具体如图 3 所示。在植物生长后期空心菜长势较旺盛,覆盖率可达到河道区段Ⅱ的 80%。



图 3 经济作物浮床区

Figure 3 Economic crop on floating bed

1.3 采样点的布设及测定指标和方法

示范工程建设及水质监测分为两个阶段进行:第一阶段为 7—8 月,600 m 河道全部种植空心菜,主要对经济作物浮床单项技术进行施工及监测,此阶段选择 3 个采样点,即 A1、A2、A3;第二阶段为 9—11 月,将靠近进水端的 100 m 空心菜替换为凤眼莲,主要是对水生植物净化区的施工以及对水生植物组合净化技术水质净化效果的监测。此阶段的采样点在第一阶段 3 个采样点的基础上,另在凤眼莲 100 m 拦截处增加了采样点 a1,用以监测凤眼莲对水质的净化作用。采样点的具体布设如图 4 所示。

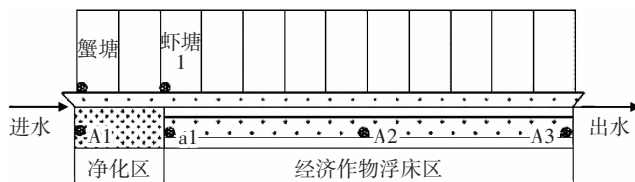


图 4 采样点的布设

Figure 4 Location of sampling site

每周采样 1 次,主要监测指标为 TN、TP、氨氮、硝态氮、COD_{Cr} 等。各项水质指标均按照《水和废水监测分析方法》进行测定^[19]。以 A1 取样点为进水水质,A3 取样点为出水水质,计算各个污染物的去除率。

2 结果与讨论

2.1 生态农业园区水产养殖情况调查

2.1.1 水产养殖基本情况调研

通过实地调研发现,松江五库生态农业园区内的水产养殖场总共有 27 个塘,每个养殖塘长 220 m,宽 50 m,面积为 11 000 m²。主要养殖品种为南美白对虾、沼虾和长江绒毛大闸蟹,养殖密度为 100 万尾/塘。南美白对虾与沼虾在 5 月下旬放养,9 月中下旬成虾陆续出塘;长江绒毛大闸蟹在 3 月下旬放苗,11 月底陆续进行捕捞。每个塘内设置 3 个曝气设备,在幼虾时曝气频率为每日 2 次。随着虾的成长曝气频率和持续时间都会相对增加,螃蟹塘内的曝气次数相对较少。虾塘基本情况如表 1 所示。

表 1 虾塘基本情况

Table 1 Basic information of shrimp pool

养殖密度/ 万尾·hm ⁻²	投料 时间/d	投料量/ kg·hm ⁻²	石灰/ kg	水质 改良剂/g	收获量/ kg·hm ⁻²
75~90	113~150	3300~7350	7.5~15	30~60	3750~5250

分别选择对虾、沼虾混养虾塘(虾塘 1)与单养对虾塘(虾塘 2)作为调研对象,2010 年间两个虾塘在整个生长周期内投料变化情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着养殖时间的增加,虾苗成长,饲料投加量也越来越大;8 月和 9 月正是虾体成长时期,所投加的饲料量最多,此段时期的排污强度亦达最高值,养殖人员会根据实际情况排换水。此外,不同品种的虾苗所需的饲料量也不同,对虾、沼虾混养虾塘中投加的饲料量比单养对虾塘普遍要高。

虾塘投加的饲料主要原料包括:优质鱼粉、乌贼膏、虾粉、啤酒酵母、磷酸、精制鱼油、高筋面、氨基酸、矿物质、微量元素、稳定性维生素、脱壳素、多糖类等。无论是对虾还是沼虾配合虾饲料,均主要以粗蛋白为主。饲料投加后,大多以氮素形式进入水体,磷素仅占 1%左右。虾的排泄物及剩余饲料的增加,亦会对水产养殖塘内水质产生影响。其他投料还包括石灰、溴氯海因等水质改良剂和消毒剂,投加量相比配合饲料来说很少,对水质没有太大影响。

2.1.2 水产养殖塘内水质监测

选取养殖场中的 2 个虾塘和 1 个蟹塘作为代表,分两个阶段对其进行常规水质指标的监测:第一阶段为 7—8 月,第二阶段为 9—11 月。每周监测 1 次,共监测 20 次。两个阶段的水质监测指标平均值如表 2

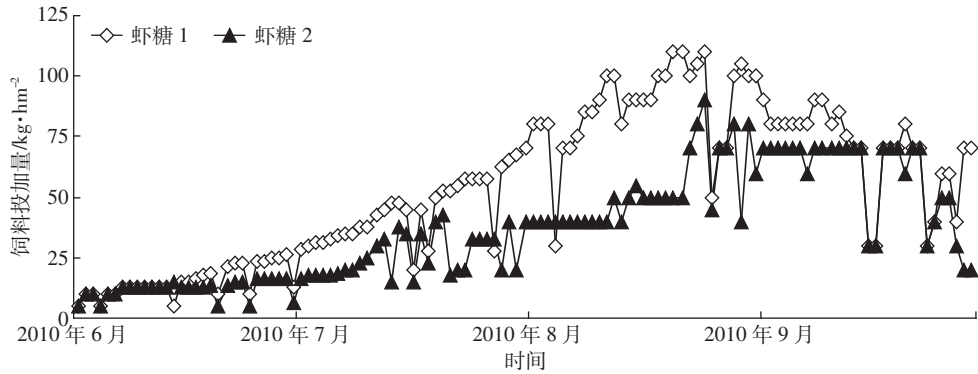


图 5 虾塘饲料投加量的变化
Figure 5 Dosage of shrimp feed

表 2 水产养殖塘内水质监测
Table 2 Water quality of aquacultural ponds

各项指标	虾塘 1		虾塘 2		蟹塘	
	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段
水温/℃	30.3	27.2	30.3	27.3	30.3	27.2
溶解氧/mg·L ⁻¹	2.95	3.32	3.27	4.58	2.83	3.06
pH 值	8.0	8.1	8.4	8.7	8.5	8.2
透明度/cm	50.7	41.0	30.5	34.0	28.7	34.7
COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	53.17	70.95	52.43	81.60	62.62	57.63
总氮/mg·L ⁻¹	2.37	3.99	2.59	2.92	2.16	2.26
氨氮/mg·L ⁻¹	1.01	1.43	0.94	0.89	0.83	0.61
硝氮/mg·L ⁻¹	1.17	1.36	1.17	1.20	1.12	1.09
亚硝氮/mg·L ⁻¹	0.05	0.21	0.08	0.22	0.02	0.01
总磷/mg·L ⁻¹	0.21	0.20	0.30	0.27	0.56	0.17

所示。对两个阶段代表性养殖塘的水质监测结果表明,7 月没有大规模的排水,各水质指标变化幅度较小;8—9 月养殖高峰期 COD_{Cr}、TN、氨氮、亚硝氮等指标大幅升高,增幅为 5%~30%。

2.1.3 水产养殖排污强度计算

结合水体的水质监测指标、排水量以及排换水规律,估算试验区域养殖塘内各污染物的排污强度,并与相关文献进行比较,结果如表 3 所示。本研究中的试验区域内水产养殖的 COD_{Cr}、TP 及 TN 排污强度分别为 3201、25.7、128.6 kg·hm⁻²,均显著高于上海市一般水产养殖水体排污强度,这可能与该区域的养殖品种与养殖密度有关。

2.2 示范工程运行效果评估

示范工程在运行一定阶段后,对其水质净化效果进行连续监测,将 2010 年示范工程建成后与 2009 年示范工程建成前同期的水质指标进行比较,对示范工程的运行效果进行功能评估,并比较经济作物浮床单项技术以及水生植物组合净化技术的运行效果。此外,

表 3 水产养殖排污强度 Table 3 Pollution intensity of aquacultural ponds				
研究区域	COD/ kg·hm ⁻²	TP/ kg·hm ⁻²	TN/ kg·hm ⁻²	备注
松江精养虾塘	3201	25.7	128.6	本研究
上海一般水产养殖*	999	4.9	101	徐祖信,2003 ^[20]
昆山一般水产养殖*	553	2.7	54	张伟,2002 ^[21]

注:* 内塘精养、河流养殖、湖泊养殖统称为一般水产养殖,其中内塘精养污染最为严重。

对此项生态修复组合技术的经济效益进行评估。

2.2.1 年度水质净化效果比较

对 2009 年与 2010 年相同养殖期(7—8 月)的水质情况进行年度比较,主要监测分析 TN、TP、COD_{Cr} 以及氨氮 4 个指标,结果如图 6 及图 7 所示。

从图中可以看出,在 7—8 月间,2009 年测得 TN、TP、COD_{Cr}、氨氮平均含量均高于 2010 年。2009 年此段时期内 TN、TP、COD_{Cr}、氨氮平均含量分别为 3.52、0.46、81.1、1.46 mg·L⁻¹;2010 年 TN、TP、COD_{Cr}、氨氮平均含量分别为 2.61、0.21、55.9、0.89 mg·L⁻¹。

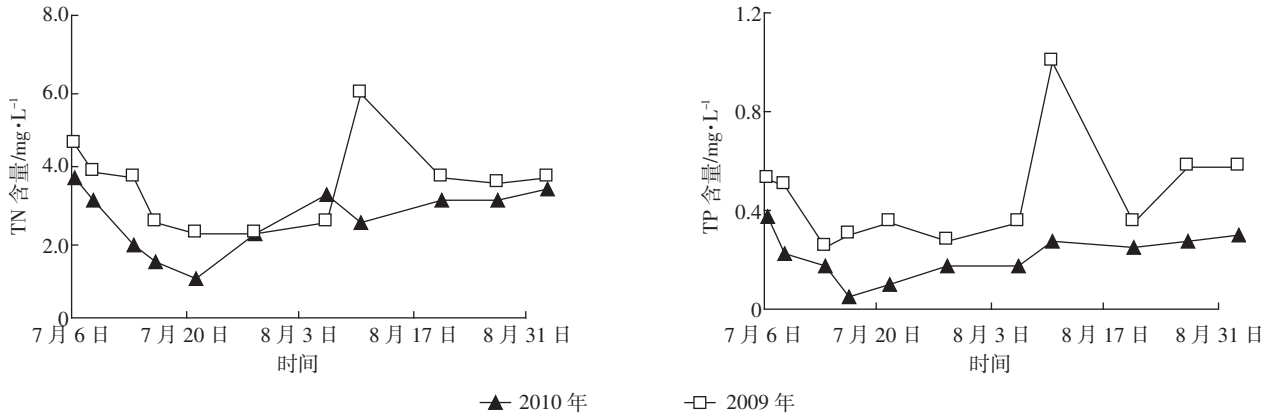
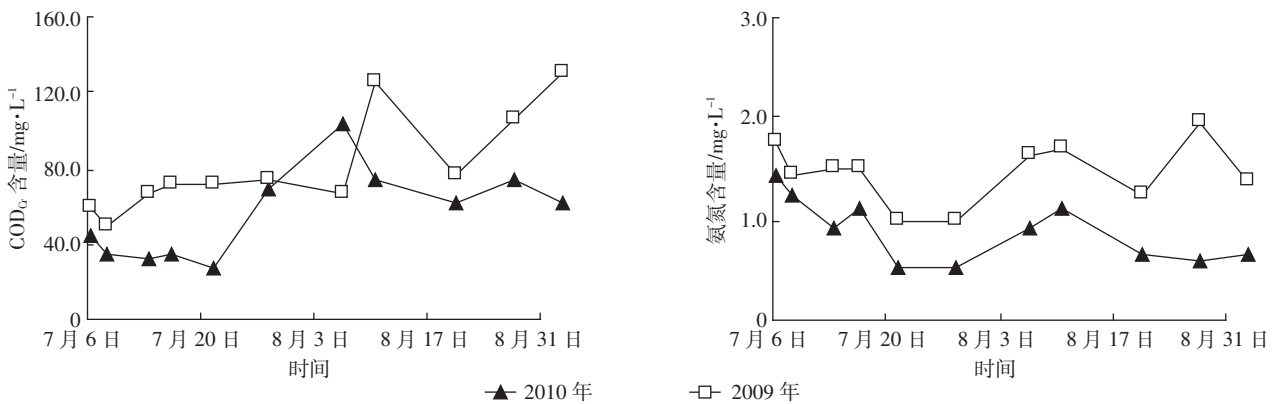


图6 河道TN和TP含量变化

Figure 6 TN and TP concentration change of river

图7 河道COD_{Cr}与氨氮含量变化Figure 7 COD_{Cr} and NH₄⁺-N concentration change of river

根据试验前期对虾养殖基本情况进行的详细调查可知,在2009年与2010年间,养殖规模和品种均未发生改变,虾塘投加饲料量亦无变化,并且试验河道是一条处于农业生态园区内的较为封闭的虾塘排水河道,因而周边污染源及污染状况未发生明显改变。另外,通过对两年间河道进水水质的连续监测,发现进水水质基本相同。可见,在污染源及虾塘投饵量均基本相同的情况下,水生植物组合净化技术对松江五库生态农业园区水产养殖排水水质具有良好的改善作用。组合技术主要利用所种植水生植物的茎、叶和根系来吸收利用、富集、吸附和固定水产养殖水体污染物,以及为微生物提供栖息地来降低养殖水体的污染。

2.2.2 两个阶段的水质净化效果比较

示范工程在两个阶段的水质净化效果比较如图8及图9所示。可以看出,水生植物组合净化技术(第二阶段)的去除率明显比水生经济作物浮床单项技术(第一阶段)高。第一阶段(第10周时)TN、TP、亚硝态氮、

COD_{Cr}的去除率分别为11.2%、27.3%、0.1%、-40.9%;第二阶段(第7周时)TN、TP、亚硝态氮、COD_{Cr}的去除率分别为40.9%、67.4%、78.8%、63.5%。

第一阶段水生经济作物浮床单项技术对总氮与总磷具有一定的去除能力,这与多数研究者的报道一致^[22-23]。然而,水生经济作物浮床单项技术对COD_{Cr}的去除率为负值,这可能是由于饵料的添加量逐渐增加,而空心菜本身去除COD_{Cr}能力较弱的缘故。

第二阶段种植的水生植物——凤眼莲生长速度快,生物量大,氮磷富集能力强,对污染水体的净化能力优于其他水生植物,被广泛应用于富营养化湖泊和河道、养殖废水以及工业废水等的处理中^[24]。凤眼莲主要通过其茎、叶的吸收作用富集和降解水体中的污染物质。另外,其根系还可以向水体释放O₂,在根系活性表面形成逐级渗透的微生物生物膜,为微生物提供栖息地,形成根际微生物生态系统,进而增强对富营养化水体的净化效果^[25]。这是第二阶段对各污染物去除率均高于第一阶段的原因所在。

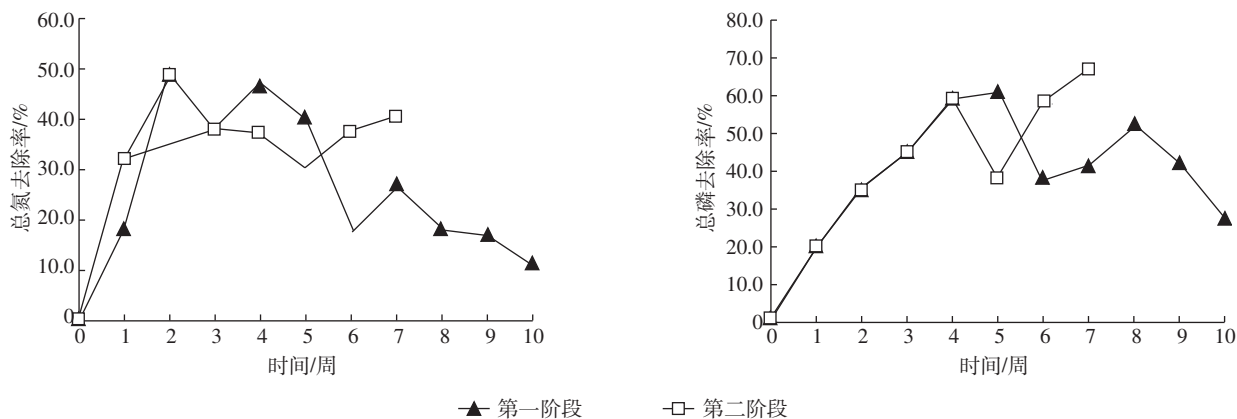
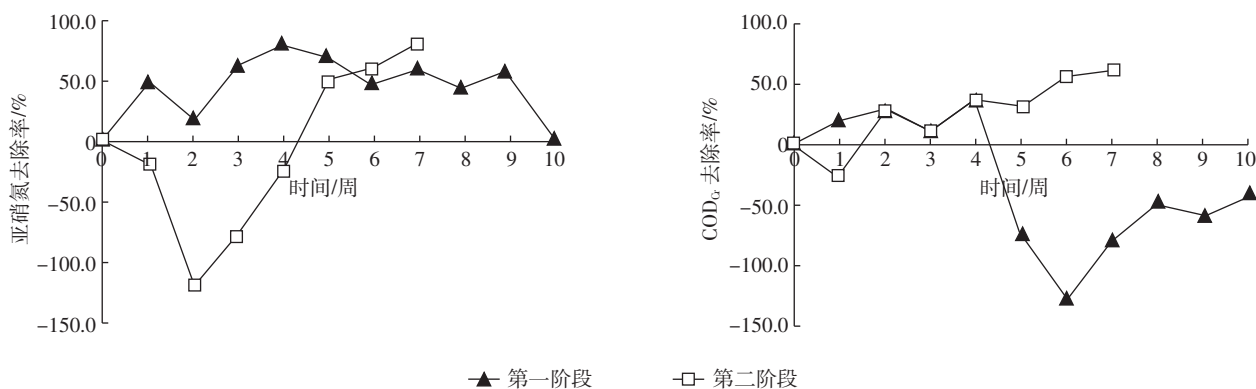


图 8 两阶段总氮去除率与总磷去除率的比较

Figure 8 TP and TN removal rate of two stages

图 9 两阶段亚硝氮与 COD_{Cr} 去除率的比较Figure 9 Nitrite nitrogen and COD_{Cr} removal rate of two stages

2.3 示范工程效益分析

水生经济作物浮床在净化水体的同时,还可产生一定的经济效益。空心菜又名蕹菜、竹叶菜等,是一年生或多年生的草本植物。在众多浮床植物类型中,空心菜具有耐污性强、成活率高、栽培简单、生物量大等特性,被证明是浮床植物的理想选材。并且,其具有很好的经济价值,营养价值高,适口性较好,可以作为蔬菜食用^[26]。将空心菜借助载体浮床种植于水产养殖的排水河道内,不仅不占用土地,还能促进产品的多样性,投资少,且产出率高,增加农民经济收入,同时也能减少作物种植方式单一的风险。

在试验期内,7、8 两月是空心菜生物量最大的时节,此时对其进行收割,每半月收割 1 次。11 月份起水温逐渐下降,空心菜也开始枯萎,此时对其进行及时收获及打捞。本次示范工程在试验期内共采收水生经济作物空心菜重量约 11 907 kg, 平均每次采收 1488 kg, 具体采收时间与重量如表 4 所示。对空心菜的经济收益进行核算,结果如表 5 所示。从产投比看,

空心菜浮床具有很好的推广价值。另外,在 7 月份将部分空心菜移植于螃蟹塘,不仅可供螃蟹食用,还可为其他水生动物提供一定的生存环境,有利于维持养殖系统的生物多样性,提高生态效益,同时还能净化

表 4 空心菜的采收情况

Table 4 Harvest of water spinach

收割时间	采收重量/kg		总重/kg	干重/kg
	第一次	第二次		
7 月	2117	1817	3934	248
8 月	1701	1820	3521	232
9 月	1150	1239	2389	155
10 月	1095	968	2063	144
总计	6063	5844	11 907	779

表 5 空心菜的经济效益分析

Table 5 Economic benefit of water spinach floating bed

投资/元·a ⁻¹			作物产量/ kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	单价/ 元·kg ⁻¹	收入/ 万元·hm ⁻² ·a ⁻¹	产投比
种苗	材料	人工费				
3000	5000	2000	45 000	6	27	1.80

螃蟹塘的水质,符合循环生态农业的模式。

3 结论

以松江五厍生态农业园区内某虾塘排水河道为示范点,通过对园区内水产养殖排换水特征的调查及研究,因地制宜的构建经济作物生态浮床净化带,并将其与水生植物净化处理相结合,提出一种水产养殖排水治理的优化组合技术,不仅可缓解水产养殖所带来的环境污染问题,还可构建绿色生态水产养殖模式,为上海地区及其他平原水网地区的水产养殖排水排放和处理提供一定的参考。主要研究结论如下:

(1)松江五厍生态农业园区水产养殖排水污染主要源于精养虾塘在养殖后期及年底清塘时较高的排换水, COD_Cr 、TN、TP 的排污强度平均分别达到 3201、128.6、25.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于上海市郊一般水产养殖平均水平。

(2)在污染源及虾塘投饵量均基本相同的情况下,比较 2009 年与 2010 年同一时段的水质情况,结果表明,示范工程能够对此区域水产养殖大量排水时的污染物有一定削减,其对 COD_Cr 、TN 及 TP 的去除率分别可达 73.5%、24.9%及 67.4%,初步解决了园区内水产养殖排水污染问题。

(3)试验期的第一阶段和第二阶段水质净化效果相比而言,虽然在养殖后期第二阶段河道中 COD_Cr 、TN、TP、亚硝态氮的平均含量都增加,但其去除率却要高于第一阶段, TN、TP、亚硝态氮和 COD_Cr 去除率分别提高 29.7%、40.1%、78.7%、114.4%。说明水生植物组合净化技术效果要优于单项技术的去除效果。

(4)对水生经济作物浮床上的空心菜进行及时采收,共收割空心菜 11 907 kg,可获得一定的经济收益,且产投比较高。此外,将部分空心菜置于蟹塘中,不仅能净化蟹塘水质,还可供螃蟹食用,在降低养殖成本的同时,亦具备一定的景观效果及水质净化效果。

参考文献:

- [1] 相建海. 海水养殖生物病害发生与控制[M]. 北京:海洋出版社, 2001.
XIANG J H. Disease occurrence and control strategies of mari culture organisms[M]. Beijing: Maritime Press, 2001.
- [2] 郑建明, 张相国, 黄 滕. 水产养殖质量安全政府规制对养殖户经济效益影响的实证分析: 基于上海的案例 [J]. 上海经济研究, 2011 (3): 92-99.
ZHENG J M, ZHANG X G, HUANG T. The influence of aquaculture products government regulation on aquaculture farmers economic benefits: Based on Shanghai case[J]. *Shanghai Journal of Economics*, 2011

- (3): 92-99.
- [3] 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.
- [4] Soriano E M, Nunes S O, Carneiro M A, et al. Nutrients' removal from aquaculture wastewater using the *Macroalgae Gracilaria birdiae* [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 22(3): 327-331.
- [5] 马红芳, 李 鑫, 胡洪营, 等. 栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1891-1896.
MA H F, LI X, HU H Y, et al. Growth, removal of nitrogen and phosphorus, and lipid accumulation property of *Scenedesmus* sp. LX1 in aquaculture wastewater[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 1891-1896.
- [6] 蒋轶锋, 刘大华, 孙同喜, 等. 沸石滤料曝气生物滤池处理水产养殖废水的工艺特性[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 703-708.
JIANG Y F, LIU D H, SUN T X, et al. Process characteristics of zeolite media biological aerated filter for treating aquaculture wastewater[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 703-708.
- [7] Boopathy R, Bonvillain C, Fontenot Q, et al. Biological treatment of low-salinity shrimp aquaculture waste water using sequencing batch reactor [J]. *Inter Biodeterioration Biodegradation*, 2007, 59(1): 16-19.
- [8] Palacios G L, Timmons M B. Determining design parameters for recovery of aquaculture wastewater using sand beds[J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24: 289-299.
- [9] 方圣琼, 胡雪峰, 巫和听. 水产养殖废水处理技术及应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(9): 51-55.
FANG S Q, HU X F, WU H X. Technology of aquaculture wastewater treatment and application[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2004, 5(9): 51-55.
- [10] Mook W T, Chakrabarti M H, Aroua M K, et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review[J]. *Desalination*, 2012, 285: 1-13.
- [11] Gregory S P, Dyson P J, Fletcher D, et al. Nitrogen removal and changes to microbial communities in model flood/drain and submerged biofilters treating aquaculture wastewater[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 37-45.
- [12] Fontenot Q, Bonvillain C, Kilgen M, et al. Effects of temperature, salinity, and carbon: Nitrogen ratio on sequencing batch reactor treating shrimp aquaculture wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1700-1703.
- [13] 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: 253-257.
- [14] 孟范平, 宫艳艳, 马冬冬. 基于微藻的水产养殖废水处理技术研究进展[J]. 微生物学报, 2009, 49(6): 691-696.
MENG F P, GONG Y Y, MA D D. Recent progress in treatment of aquaculture wastewater based on microalgae: A review[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2009, 49(6): 691-696.
- [15] 马 旻, 朱昌雄, 梁浩亮, 等. 几种植物对水产养殖废水的修复效果

- [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6):18-22.
- MA M, ZHU C X, LIANG H L, et al. Repairing effect of several plants on the aquaculture wastewater of fisheries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(6):18-22.
- [16] 杨丹菁, 靖元孝. 植物在水产养殖废水处理中的研究进展[J]. 生态科学, 2008, 27(6):522-526.
- YANG D J, JING Y X. Advances in plants in aquaculture wastewater treatment[J]. *Ecological Science*, 2008, 27(6):522-526.
- [17] 李晨光. 凤眼莲净化治理滇池蓝藻污染的可行性研究[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(3):64-68.
- LI C G. A feasibility study on blue algae pollution control by Water Hyacinth in Lake Dianchi [J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(3):64-68.
- [18] WANG Z X, Calderon M M. Environmental and economic analysis of application of water hyacinth for eutrophic water treatment coupled with biogas production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 110:246-253.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:223-281.
- State Environmental Protection Administration editorial committee. Water and wastewater monitoring method[M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:223-281.
- [20] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2003.
- XU Z X. Planning theory and practice of river pollution control[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [21] 张 伟. 昆山市养殖业污染状况及防止对策[J]. 污染防治技术, 2002, 15(2):60-62.
- ZHANG W. Condition of pollution and countermeasures to breeding of Kunshan City[J]. *Pollution Control Technology*, 2002, 15(2):60-62.
- [22] 唐莹莹, 李秀珍, 周元清, 等. 浮床空心菜对氮循环细菌数量与分布和氮素净化效果的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9):2837-2846.
- TANG Y Y, LI X Z, ZHOU Y Q, et al. Effect of *Ipomoea aquatica* Floating-bed on the quantity and distribution of nitrogen cycling bacteria and nitrogen removal[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9):2837-2846.
- [23] 宋 超, 陈家长, 戈贤平, 等. 浮床栽培空心菜对罗非鱼养殖池塘水体中氮和磷的控制[J]. 中国农学通报, 2011, 27(23):70-75.
- SONG C, CHEN J Z, GE X P, et al. The Control of nitrogen and phosphorus to tilapia fish pond by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica*) [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(23):70-75.
- [24] 张迎颖, 张志勇, 王亚雷, 等. 滇池不同水域凤眼莲生长特性及氮磷富集能力[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6):73-77.
- ZHANG Y Y, ZHANG Z Y, WANG Y L, et al. Research on the growth characteristics and accumulation ability to N and P of *Eichhornia crassipes* in different water areas of Dianchi Lake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(6):73-77.
- [25] YI Q, KIM Y, TATEDA M. Evaluation of nitrogen reduction in water hyacinth ponds integrated with waste stabilization ponds[J]. *Desalination*, 2009, 249(2):528-534.
- [26] 贾 悦, 李秀珍, 唐莹莹, 等. 不同采收方式对富营养化河道浮床空心菜生物产出的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6):1091-1099.
- JIA Y, LI X Z, TANG Y Y, et al. Effects of different cutting regimes on the productivity of *Ipomoea aquatica* Forsk planted on floating-mats in a eutrophicated river of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6):1091-1099.