

文章编号: 1674-5566(2018)01-0098-08

DOI:10.12024/jso.20170602071

“空心菜-水芹”轮作对养殖池塘水质和底质环境的影响

郑尧^{1,2}, 陈家长^{1,2,3}, 胡庚东^{1,2}, 赵志祥³, 孟顺龙^{1,2}, 范立民^{1,2}, 宋超^{1,2}, 邴旭文^{1,2,3}

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081; 2. 农业部水产品质量安全环境因子风险评估实验室, 江苏 无锡 214081; 3. 南京农业大学 无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081)

摘要: 通过测定 TOC、COD、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 等水质指标和底泥中 TOC、TN、TP 指标, 探究“空心菜-水芹”轮作模式对不同养殖品种和养殖数量情况下养殖池塘水质和底质环境的影响。结果表明, 在轮作模式前期, 空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 种植能显著降低甘露青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 养殖场 TOC、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 等水质指标, 能显著降低苏州经济鱼亲本塘 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP 等水质指标。轮作后期水芹 (*Oenanthe stolonifera*) 种植能降低甘露青鱼养殖场 TOC、NO₃⁻-N、TP 等水质指标, 降低苏州经济鱼亲本塘 TOC、COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 等水质指标。轮作前、后期均能降低底质 TOC、TN 和 TP 含量。“空心菜-水芹”轮作模式能显著降低养殖池塘水体中 TOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 指标和底泥中 TOC、TN、TP 指标。

关键词: 水质; 底泥; 轮作; 原位修复

中图分类号: X 524 **文献标志码:** A

课题组前期针对池塘水质净化原位修复技术采用循环水养殖^[1]和鱼菜共生体系构建^[2-3]取得了较好的效果, 结果表明空心菜显著降低鲫 (*Carassius auratus*) 养殖池塘中水体 TP、COD 含量^[2]; 水芹能改善水体中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 等指标, 对水体中 TN 去除率达到了 79.9%, TP 去除率为 92.5%。近期课题组提出中草药浮床 (如鱼腥草 *Houttuynia cordata* Thunb、虎杖 *Polygonum cuspidatum*、薄荷 *Mentha haplocalyx* Briq. 等) 不仅可用来调控吉富罗非鱼 (*Oreochromis niloticus* GIFT) 养殖池塘水质^[4], 还能起到增强吉富罗非鱼免疫能力的功效^[5]; 此外, 中草药浮床还能改善池塘微生物群落结构, 增强鱼类抗病能力^[6]。池塘底质全年持续不断释放氮、磷, 若进行清淤或池塘改造需耗费大量人力和财力。“鱼草模式”、“鱼菜模式”等模式虽较为成功, 但受养殖品种和季节限制。轮作一方

面可利用植物的不同生长阶段 (季节) 实现全年对池塘水质的净化处理, 还能根据池塘的污染特征选择不同的水上植物修复模式 (品种、配比)。

目前较为成功的轮作模式有: “鱼藕 *Nelumbo nucifera* Gaertn” 模式^[7-8], “鱼草” 模式^[9], “虾蟹-油菜 *Brassica campestris* L.” 模式等。研究表明多年养殖鱼塘连续种藕 2 年, 其 TN、TP 和有机质 (OM) 含量会明显下降^[7], 池塘底质生物多样性增强^[8]。水上种植同一植物对不同养殖品种的池塘的水质净化效果不一^[2,4], 不同植物对同一养殖品种池塘的水质净化效果也不一致。不同植物品种的最佳生长季节不一: 空心菜、鱼腥草、薄荷、虎杖等适合在夏季进行种植, 水芹、黑麦草等在冬季仍能继续生长。池塘轮作修养政策的大范围实施还存在诸多困难, 特别是在很多贫困偏远山区难以实现。为了解决池塘老化这一问题, 目前对于池塘轮作的基础研究较少, 特

收稿日期: 2017-06-01 修回日期: 2017-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAD13B03)

作者简介: 郑尧 (1986—), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为渔业生态环境保护。E-mail: zhengy@ffrc.cn

通信作者: 邴旭文, E-mail: bingxw@ffrc.cn

别是针对具特色的区域型示范养殖基地(不同养殖品种、同一养殖品种不同养殖数量),轮作对不同养殖模式(品种和数量)污染物去除效果上是否存在差别也不得而知。本试验旨在通过检测“空心菜-水芹”轮作模型能否通过降低池塘中水质和底质环境浓度,探究其能否改善池塘老化现象,进而达到改善水质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验设计

养殖池塘:针对不同养殖品种,试验基地选择无锡市甘露无公害青鱼养殖基地(养殖青鱼,2.8 hm²,每口塘0.47 hm²,实验 e1 和对照 e0 塘各3个重复)和苏州市未来水产养殖场(养殖经济鱼亲本,6 hm²,每口塘0.67 hm²,试验 w1、w2 和对照 w0 塘各3个重复)。针对同一养殖品种不同养殖数量,试验选择苏州市未来水产养殖场中投放不同数量花鲢的养殖池塘,试验用池塘水深1.5 m(配备微孔增氧系统)。无锡市甘露无公害青鱼养殖基地 e0 对照塘和 e1 空心菜-水芹塘养殖青鱼数量为2000尾(6 kg/尾)。苏州市未来水产养殖场养殖品种及数量为:青鱼(400尾7.5 kg/尾)、草鱼(300尾5 kg/尾)、白鲢(50尾10 kg/尾)、鲫(300尾1 kg/尾)、鳊鱼(300尾1.5 kg/尾)。w0、w1 和 w2 塘花鲢(20 kg/尾)数量分别为8,11,28尾。

浮床种植:试验选用 PVC 管材料($\varphi = 50$ mm)制作浮床,规格为2 m \times 2 m。浮床两面分别用网孔为30 mm(便于苗扦插)的网片包裹。试验开始前,将预先培育好的空心菜(*Ipomoea aquatica*)和水芹苗(*Oenanthe stolonifera*,株高20 cm),按株行距30 cm \times 20 cm进行扦插,并将浮床集中固定在池塘中排列整齐,每3个浮床用尼龙绳连接成组。根据前期试验结果,本试验选择在 e1、w1 和 w2 塘进行种植,5%(占池塘总面积)作为轮作模型的种植比例。无锡市甘露无公害青鱼养殖基地试验塘初始种植空心菜和水芹的质量分别均为175 kg;苏州市未来水产养殖场试验塘初始种植空心菜和水芹的质量分别均为250 kg。

轮作方式:试验于2016年5月份开始,6—9月份为轮作前期空心菜种植阶段;10月—2017年1月为轮作后期水芹种植阶段。

1.2 试验方法

在轮作前期(空心菜)和后期(水芹)种植阶段分别采集水样(五点法)和底泥样本(彼得逊抓斗式采泥器)。采样时间固定为每月18号上午10:00左右。通过采集对照塘、浮床种植区水样2 L,按《水和废水监测分析方法》测量 TOC、COD_{Mn}、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 等水质指标;同时采集底泥样本100 g,对底泥样本的 TOC、TN、TP 进行分析。

水样指标测定按《水和废水监测分析方法》进行^[4]。

采取底泥,对2016年6月—2017年1月(5月份投喂饲料较少)底泥中的 TOC、TN、TP 进行测定,TOC 采用重铬酸钾法;TN 采用凯氏定氮法;TP 采用高氯酸-硫酸消化法。

1.3 统计学分析

数据结果表示采用“均值 \pm 标准差”,用 SPSS 11.0 软件进行 ANOVA 分析(LSD 法检验), $P < 0.05$ 认为差异显著,分别用不同小写字母或星号表示。

2 结果与分析

2.1 不同养殖品种比较

2.1.1 轮作前期(空心菜种植阶段)

结果表明轮作前期6月份甘露青鱼养殖场空心菜浮床种植区 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 显著下降(表1);7月份 TOC、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 显著下降;8月份 TOC、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 显著下降;9月份 TOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 显著下降。本试验结果说明,空心菜能显著降低甘露青鱼养殖场 TOC、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 等水质指标。

轮作前6月份苏州未来养殖场空心菜浮床种植区 TOC、COD、Chl、TN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP 显著下降(表2);7月份 COD、TN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 显著下降;8月份 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 显著下降;9月份 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP 显著下降。本试验结果说明,空心菜能显著降低苏州经济鱼亲本塘 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP 等水质指标。

甘露青鱼养殖场轮作前8月份空心菜浮床

种植塘底泥中 TOC 显著降低(图 1);空心菜浮床种植塘底泥中 TN 6 和 8 月显著降低(图 2);空心菜浮床种植塘底泥中 TP 7—9 月均出现了显著降低(图 3)。苏州未来水产养殖场空心菜浮床种植塘底泥中 TOC 6—9 月出现了显著降低(图 4);空心菜浮床种植塘底泥中 TN 6 月、7 月、9 月出现了显著降低(图 5);空心菜浮床种植塘底泥中 TP 7—9 月出现了显著降低(图 6)。轮作前期甘露青鱼养殖场和苏州未来水产养殖场合计收获空心菜质量分别为 700.35 kg,1 000.2 kg。

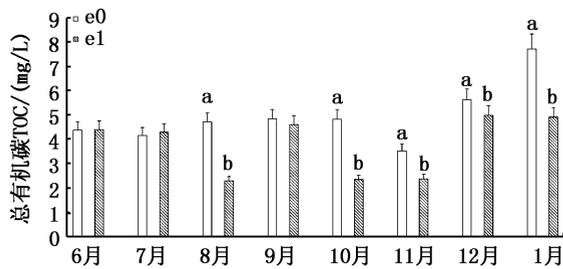


图 1 无锡市甘露无公害青鱼养殖基地轮作塘底泥 TOC 指标

Fig. 1 TOC index in Ganlu herring (*Mylopharyngodon piceus*) pond by rotation model

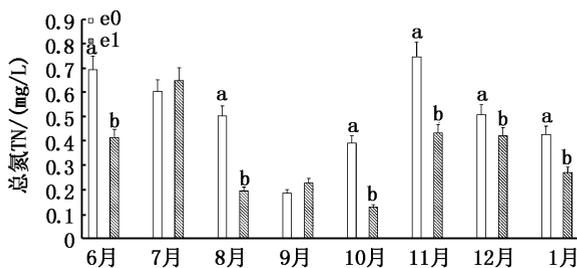


图 2 无锡市甘露无公害青鱼养殖基地轮作塘底泥 TN 指标

Fig. 2 TN index in Ganlu herring (*Mylopharyngodon piceus*) pond by rotation model

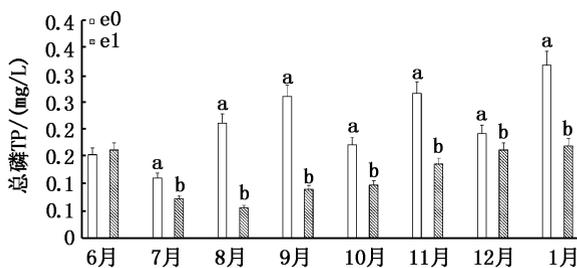


图 3 无锡市甘露无公害青鱼养殖基地轮作塘底泥 TP 指标

Fig. 3 TP index in Ganlu herring (*Mylopharyngodon piceus*) pond by rotation model

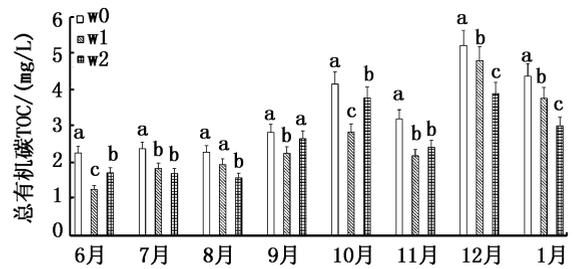


图 4 苏州市未来水产养殖场轮作塘底泥 TOC 指标
Fig. 4 TOC index in Suzhou economic parental fish pond by rotation model

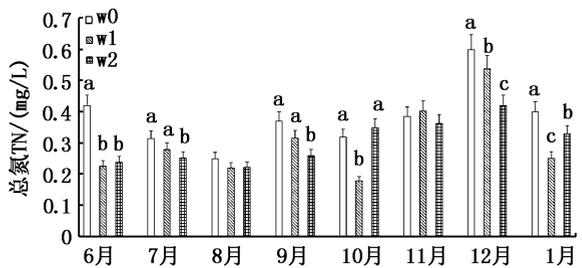


图 5 苏州市未来水产养殖场轮作塘底泥 TN 指标
Fig. 5 TP index in Suzhou economic parental fish pond by rotation model

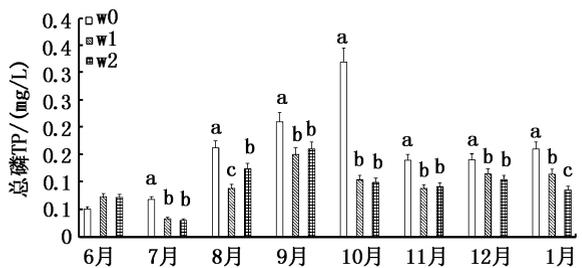


图 6 苏州市未来水产养殖场轮作塘底泥 TP 指标
Fig. 6 TP index in Suzhou economic parental fish pond by rotation model

2. 1. 2 轮作后期(水芹种植阶段)

轮作后期 10 月份甘露青鱼养殖场水芹浮床种植区 TOC、COD、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 显著下降(表 1); 11 月份 TOC、COD、Chl、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 显著下降; 12 月份 TOC、NO₃⁻-N、TP 显著下降; 2017 年 1 月份 TOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP、PO₄³⁻-P 显著下降。本试验结果说明,水芹能显著降低甘露青鱼养殖场 TOC、NO₃⁻-N、TP 等水质指标。

轮作后 10 月份苏州未来养殖场水芹浮床种植区 TOC、COD、Chl、TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP 显著下降(表 2); 11 月份 TOC、COD、TN、

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 显著下降;12 月份 TOC、COD、Chl、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 显著下降;1 月份 TOC、COD、Chl、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 显著下降。本试验结果说明,水芹能显著降低苏州经济鱼亲本塘 TOC、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 等水质指标。

甘露青鱼养殖场轮作后 2016 年 10 月—2017 年 1 月水芹浮床种植塘底泥中 TOC、TN 和 TP 显著降低(图 1~3)。苏州未来水产养殖场水芹浮床种植塘底泥中 TOC、TP 出现了显著降低(图 4, 6);水芹浮床种植塘底泥中 TN 10 月(w1 塘)、12 月、1 月出现了显著降低(图 5)。轮作后期甘露青鱼养殖场和苏州未来水产养殖场合计收获水芹质量分别为 444.5 和 635.1 kg。

“空心菜-水芹”轮作模式能显著降低养殖池塘水体中 TOC、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 指标和底泥中 TOC、TN、TP 指标,此轮作模式下不同养殖品种、数量对水质指标存在影响,适合在混养池塘进行示范推广。

2.2 不同养殖数量比较

随着花鲢养殖数量的增加,轮作前期 6 月份 Chl、TP 浓度依次显著降低,TN 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 TOC、COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 显著低于 w2 组;7 月份 COD、TN、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TP 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 TOC、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 显著低于 w2 组;8 月份 TOC、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度依次显著降低,COD、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 Chl、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 显著低于 w2 组;9 月份 COD、Chl、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 TOC、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 显著低于 w2 组。轮作后期 10 月份 TOC 浓度依次显著降低,TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 COD、Chl 显著低于 w2 组;11 月份 TOC、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度依次显著降低,COD、TN、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TP 在 w1 和 w2 间无显著

性差异,w1 组 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 显著低于 w2 组;12 月份 TOC、COD、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度依次显著降低,TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TP 在 w1 和 w2 间无显著性差异,w1 组 Chl 显著低于 w2 组;2017 年 1 月份 TOC、COD 浓度依次显著降低,Chl、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 在 w1 和 w2 间无显著性差异。

随着花鲢养殖数量的增加,苏州未来水产养殖场底泥 TOC 指标在 12 月、1 月依次显著降低,但 6、9、10 月份 w1 组 TOC 显著低于 w2 组;TN 指标在 12 月依次显著降低,但 10、1 月份 w1 组 TN 显著低于 w2 组;TP 指标在 1 月份依次显著降低,但 8 月份 w1 组 TP 显著低于 w2 组,在其他月份 w1、w2 组 TP 无显著差异。

3 讨论

3.1 轮作模式下不同养殖品种对污染物指标的影响

研究表明浮床经济植物能降低水体中的 TN、TP 含量^[2,4],课题组研究还表明中草药鱼腥草(*H. cordata* Thunb)浮床种植能显著降低吉富罗非鱼养殖池塘 COD、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 含量^[4]。本试验中,“空心菜-水芹”轮作模式前期(空心菜种植阶段)能显著降低青鱼和经济鱼养殖水体中 TOC、Chl、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,轮作后期(水芹种植阶段)能显著降低水体中 TOC、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 含量,这与之前的结果保持一致^[2,4],并与大水面放养水葫芦(*Eichhornia crassipes*)对水质环境改善结果相一致^[10]。轮作前、后期均能降低不同养殖品种底质中 TOC、TN、TP 含量,与单独种植水上植物(鱼腥草、虎杖、“鱼腥草-空心菜-鱼腥草”三明治模型)结果相一致。一方面,“空心菜-水芹”轮作模式不仅能降低水环境污染物质浓度,还能降低底质的污染物浓度,此外,还能针对不同的养殖品种具有类似的水质和底质净化作用效果。

表 1 无锡市甘露无公害青鱼养殖基地轮作水质指标

Tab. 1 Water index in Ganlou herring (<i>Mylopharyngodon piceus</i>) pond by rotation model		mg/L								
		总有机碳 TOC	高锰酸盐 指数 COD _{Mn}	叶绿素 Chl	总氮 TN	氨氮 NH ₄ ⁺ -N	亚硝酸盐氮 NO ₂ ⁻ -N	硝酸盐氮 NO ₃ ⁻ -N	总磷 TP	磷酸盐 PO ₄ ³⁻ -P
6 月 June	e0 对照塘 e0 control	18.80 ± 1.23 ^a	18.62 ± 1.23 ^a	16.33 ± 1.34 ^a	5.97 ± 0.41	1.33 ± 0.12 ^a	0.06 ± 0.01 ^a	1.77 ± 0.03 ^a	0.56 ± 0.12	0.04 ± 0.01 ^a
	e1 空心菜塘 e1 water spinach	6.82 ± 0.54 ^b	7.44 ± 0.31 ^b	8.92 ± 0.65 ^b	4.95 ± 0.42	0.50 ± 0.10 ^b	0.03 ± 0.01 ^b	0.94 ± 0.04 ^b	0.43 ± 0.13	0.01 ± 0.01 ^b
7 月 July	e0 对照塘 e0 control	16.30 ± 2.14 ^a	19.29 ± 1.09	15.04 ± 1.65 ^a	7.02 ± 0.52	2.10 ± 0.14 ^a	0.71 ± 0.08 ^a	1.97 ± 0.10 ^a	0.99 ± 0.26	0.54 ± 0.03 ^a
	e1 空心菜塘 e1 water spinach	13.60 ± 2.16 ^b	19.09 ± 1.12	10.72 ± 1.00 ^b	6.70 ± 0.63	0.54 ± 0.16 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.97 ± 0.13 ^b	0.79 ± 0.14	0.33 ± 0.02 ^b
8 月 August	e0 对照塘 e0 control	23.20 ± 0.21 ^a	26.63 ± 3.14	11.31 ± 1.04 ^a	8.24 ± 0.42 ^a	5.80 ± 0.24 ^a	0.34 ± 0.06 ^a	2.14 ± 0.15 ^a	1.09 ± 0.14	0.42 ± 0.02
	e1 空心菜塘 e1 water spinach	20.01 ± 0.13 ^b	25.19 ± 3.15	9.62 ± 0.90 ^b	6.62 ± 0.32 ^b	4.51 ± 0.14 ^b	0.15 ± 0.02 ^b	1.04 ± 0.08 ^b	0.87 ± 0.10	0.34 ± 0.02
9 月 September	e0 对照塘 e0 control	28.80 ± 3.21 ^a	20.61 ± 1.75	7.29 ± 0.71	6.19 ± 0.29	3.39 ± 0.17 ^a	0.12 ± 0.01	1.14 ± 0.09 ^a	0.95 ± 0.04 ^a	0.57 ± 0.03 ^a
	e1 空心菜塘 e1 water spinach	21.00 ± 1.23 ^b	20.24 ± 2.06	5.83 ± 0.51	6.10 ± 0.21	2.82 ± 0.16 ^b	0.11 ± 0.01	0.30 ± 0.08 ^b	0.65 ± 0.04 ^b	0.16 ± 0.01 ^b
10 月 October	e0 对照塘 e0 control	20.00 ± 0.65 ^a	23.38 ± 1.20 ^a	7.95 ± 0.85	11.86 ± 0.36	4.81 ± 0.12 ^a	0.15 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.68 ± 0.03	0.17 ± 0.03 ^a
	e1 水芹塘 e1 cress	11.10 ± 0.54 ^b	19.12 ± 0.85 ^b	7.91 ± 0.64	10.57 ± 0.57	2.16 ± 0.23 ^b	0.11 ± 0.03	0.20 ± 0.04	0.71 ± 0.04	0.09 ± 0.01 ^b
11 月 November	e0 对照塘 e0 control	21.10 ± 0.41 ^a	21.26 ± 1.35 ^a	5.70 ± 0.34 ^a	8.26 ± 0.64	4.91 ± 0.15 ^a	0.03 ± 0.01	1.52 ± 0.14 ^a	0.69 ± 0.05 ^a	0.08 ± 0.01
	e1 水芹塘 e1 cress	14.10 ± 0.25 ^b	12.61 ± 0.48 ^b	4.63 ± 0.28 ^b	8.44 ± 0.42	1.65 ± 0.11 ^b	0.03 ± 0.01	0.17 ± 0.03 ^b	0.47 ± 0.03 ^b	0.06 ± 0.01
12 月 December	e0 对照塘 e0 control	18.56 ± 0.62 ^a	16.69 ± 0.53	5.25 ± 0.20	11.89 ± 1.31	8.37 ± 0.16	0.04 ± 0.01	0.88 ± 0.05 ^a	0.48 ± 0.04 ^a	0.05 ± 0.01
	e1 水芹塘 e1 cress	10.89 ± 0.31 ^b	15.60 ± 0.54	5.21 ± 0.34	11.23 ± 1.19	8.83 ± 0.42	0.03 ± 0.01	0.43 ± 0.06 ^b	0.39 ± 0.03 ^b	0.06 ± 0.01
1 月 January	e0 对照塘 e0 control	17.63 ± 0.74 ^a	17.83 ± 1.34	6.79 ± 0.56 ^a	17.60 ± 1.42	5.63 ± 0.16 ^a	0.06 ± 0.02	0.60 ± 0.05 ^a	0.40 ± 0.03	0.07 ± 0.02
	e1 水芹塘 e1 cress	10.24 ± 0.36 ^b	16.31 ± 0.96	5.17 ± 0.47 ^b	15.20 ± 1.30	4.09 ± 0.18 ^b	0.09 ± 0.02	0.48 ± 0.03 ^b	0.34 ± 0.04	0.07 ± 0.02

注:不同小写字母表示同一月份同一检测指标在不同处理组差异显著,表 2 同此

Note: Different lowercase letters indicate the significant difference between different treatment, the same as Tab. 2

“空心菜-水芹”轮作前、后期均能造成水环境中 TOC、NO₃⁻-N 含量的降低,原因在于浮床根系能形成生物膜通过生物絮凝作用将水体悬浮物沉降至池塘底部^[11];水上植物能使根系泌氧速率加快^[12],根系形成的微氧环境有利于还原型和氧化型有机氮之间的相互转换。本研究中轮作前期空心菜能造成水环境中 Chl、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 的含量,与之前的结果相一致^[2],证实水体中氮的去除主要通过根际微生物的硝化-反硝化反应来去除^[13]。轮作后期水芹造成 TP 含量降低,不能造成 NO₂⁻-N 含量的降低,与之前的研究结果相一致^[14]。虽与水芹能提高污水中脱氮细菌多样性的研究结果不同^[15],但与微曝气生态水芹浮床对污染河水磷的吸收效率结果(18.53% ~ 26.82%)相一致^[16]。

3.2 轮作模式下不同养殖数量对污染物指标的影响

在同一养殖品种下随着花鲢数量的增加,轮作前期(空心菜)COD、NO₂⁻-N 在中密度组(w1, 11 尾)和高密度组(w2, 28 尾)中无显著差异,w1 组 TOC、NO₃⁻-N 显著低于 w2 组,一方面说明空心菜种植降低 NO₂⁻-N 与投放花鲢的数量无关,且投放过多的花鲢不利于 TOC、NO₃⁻-N 浓度的降低。轮作后期(水芹)TOC 能随花鲢数量的增多依次显著降低,但 TN、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TP 浓度的降低与投放花鲢的数量无对应关系。在此轮作模式下,不同数量花鲢能影响水体中 TOC 含量,这可能与腐质及细菌数量相关^[17]。

表 2 苏州市未来水产养殖场轮作指标总体情况

		Tab. 2 Water index in Suzhou economic parental fish pond by rotation model								mg/L	
		总有机碳 TOC	高锰酸盐 指数 COD _{Mn}	叶绿素 Chl	总氮 TN	氨氮 NH ₄ ⁺ -N	亚硝酸盐氮 NO ₂ ⁻ -N	硝酸盐氮 NO ₃ ⁻ -N	总磷 TP	磷酸盐 PO ₄ ³⁻ -P	
6 月 June	w0	6.62 ± 0.10 ^a	15.48 ± 0.15 ^a	5.44 ± 0.03 ^a	3.07 ± 0.23 ^a	1.27 ± 0.04 ^a	0.25 ± 0.01 ^a	0.79 ± 0.02 ^a	0.92 ± 0.21 ^a	0.05 ± 0.00	
	w1	4.51 ± 0.12 ^c	7.84 ± 0.07 ^c	4.05 ± 0.25 ^b	2.41 ± 0.11 ^b	1.20 ± 0.01 ^a	0.00 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.01 ^c	0.35 ± 0.06 ^b	0.05 ± 0.00	
	w2	5.25 ± 0.07 ^b	11.17 ± 0.11 ^b	2.66 ± 0.42 ^c	2.45 ± 0.21 ^b	0.89 ± 0.04 ^b	0.02 ± 0.00 ^b	0.36 ± 0.03 ^b	0.28 ± 0.02 ^c	0.05 ± 0.00	
7 月 July	w0	11.40 ± 0.12 ^b	14.47 ± 0.12 ^a	14.08 ± 0.53 ^c	4.28 ± 0.22 ^a	2.46 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.00 ^a	0.90 ± 0.08 ^a	0.34 ± 0.03 ^a	0.04 ± 0.00 ^a	
	w1	5.83 ± 0.05 ^c	7.92 ± 0.07 ^b	17.30 ± 0.10 ^b	2.76 ± 0.21 ^b	2.25 ± 0.03 ^a	0.00 ± 0.00 ^b	0.14 ± 0.01 ^c	0.19 ± 0.01 ^b	0.00 ± 0.00 ^b	
	w2	16.30 ± 0.16 ^a	7.31 ± 0.05 ^b	21.03 ± 0.14 ^a	2.91 ± 0.12 ^b	0.70 ± 0.09 ^b	0.03 ± 0.00 ^b	0.54 ± 0.00 ^b	0.21 ± 0.01 ^b	0.00 ± 0.00 ^b	
8 月 August	w0	17.70 ± 0.17 ^a	26.45 ± 0.26 ^a	9.87 ± 0.04 ^a	8.39 ± 0.44	1.11 ± 0.08 ^a	0.07 ± 0.00 ^a	1.04 ± 0.11 ^a	0.48 ± 0.02 ^a	0.36 ± 0.03 ^a	
	w1	15.50 ± 0.15 ^b	8.99 ± 0.08 ^b	3.53 ± 0.43 ^c	7.82 ± 0.33	0.33 ± 0.02 ^b	0.02 ± 0.00 ^b	0.46 ± 0.02 ^c	0.24 ± 0.02 ^c	0.22 ± 0.02 ^b	
	w2	13.30 ± 0.11 ^c	8.81 ± 0.04 ^b	6.60 ± 0.16 ^b	7.73 ± 0.15	0.12 ± 0.03 ^c	0.02 ± 0.00 ^b	0.65 ± 0.03 ^b	0.30 ± 0.04 ^b	0.20 ± 0.02 ^b	
9 月 September	w0	13.10 ± 0.10 ^a	13.97 ± 0.11 ^a	5.51 ± 0.15 ^a	4.61 ± 0.14 ^a	2.71 ± 0.24 ^a	0.46 ± 0.01 ^a	0.80 ± 0.01 ^a	0.36 ± 0.06 ^a	0.16 ± 0.01	
	w1	7.46 ± 0.07 ^c	9.73 ± 0.07 ^b	3.03 ± 0.13 ^b	2.98 ± 0.12 ^b	0.59 ± 0.01 ^c	0.03 ± 0.00 ^b	0.54 ± 0.05 ^b	0.18 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.01	
	w2	8.31 ± 0.08 ^b	9.92 ± 0.05 ^b	2.83 ± 0.11 ^b	4.40 ± 0.17 ^a	2.09 ± 0.13 ^b	0.03 ± 0.00 ^b	0.69 ± 0.04 ^b	0.26 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.01	
10 月 October	w0	10.10 ± 0.21 ^a	18.75 ± 0.17 ^a	7.38 ± 0.07 ^a	7.24 ± 0.08 ^a	3.09 ± 0.03 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.32 ± 0.02 ^a	0.47 ± 0.04 ^a	0.09 ± 0.02	
	w1	3.38 ± 0.04 ^b	8.93 ± 0.09 ^c	3.53 ± 0.03 ^c	6.73 ± 0.06 ^b	1.42 ± 0.12 ^b	0.02 ± 0.00 ^b	0.03 ± 0.01 ^b	0.29 ± 0.03 ^b	0.09 ± 0.02	
	w2	2.77 ± 0.03 ^c	12.08 ± 0.12 ^b	4.63 ± 0.04 ^b	6.76 ± 0.06 ^b	1.16 ± 0.12 ^b	0.03 ± 0.00 ^b	0.06 ± 0.01 ^b	0.28 ± 0.03 ^b	0.09 ± 0.02	
11 月 November	w0	7.22 ± 0.05 ^a	7.46 ± 0.08 ^a	3.66 ± 0.03 ^a	4.50 ± 0.04 ^a	0.57 ± 0.05 ^a	0.04 ± 0.01 ^a	0.60 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.08 ± 0.01	
	w1	6.49 ± 0.06 ^b	6.72 ± 0.05 ^b	1.96 ± 0.01 ^b	3.27 ± 0.03 ^b	0.19 ± 0.02 ^c	0.01 ± 0.00 ^b	0.41 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.01	
	w2	3.77 ± 0.04 ^c	6.17 ± 0.04 ^b	3.85 ± 0.03 ^a	3.72 ± 0.03 ^b	0.37 ± 0.04 ^b	0.01 ± 0.00 ^b	0.27 ± 0.03 ^c	0.16 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.02	
12 月 December	w0	9.84 ± 0.07 ^a	14.52 ± 0.12 ^a	3.98 ± 0.03 ^a	3.56 ± 0.03 ^a	2.34 ± 0.15 ^a	0.02 ± 0.00 ^a	0.50 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.02 ^a	0.07 ± 0.01	
	w1	6.54 ± 0.06 ^b	12.68 ± 0.10 ^b	2.15 ± 0.02 ^c	2.67 ± 0.02 ^b	1.09 ± 0.10 ^b	0.00 ± 0.00 ^b	0.29 ± 0.03 ^b	0.12 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.01	
	w2	5.42 ± 0.05 ^c	11.95 ± 0.09 ^c	3.22 ± 0.03 ^b	2.61 ± 0.03 ^b	1.11 ± 0.10 ^b	0.00 ± 0.00 ^b	0.13 ± 0.03 ^c	0.10 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.01	
1 月 January	w0	10.23 ± 0.07 ^a	8.52 ± 0.07 ^a	2.14 ± 0.02 ^a	3.65 ± 0.24	0.21 ± 0.02 ^a	0.01 ± 0.00	0.25 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.02	
	w1	8.57 ± 0.06 ^b	5.83 ± 0.04 ^b	1.14 ± 0.02 ^b	3.12 ± 0.13	0.11 ± 0.02 ^b	0.00 ± 0.00	0.17 ± 0.02 ^b	0.12 ± 0.01 ^b	0.08 ± 0.01	
	w2	6.52 ± 0.05 ^c	4.50 ± 0.03 ^c	1.59 ± 0.02 ^b	3.90 ± 0.44	0.09 ± 0.02 ^b	0.00 ± 0.00	0.13 ± 0.02 ^b	0.12 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.01	

3.3 水芹在此轮作模式中的推广应用前景

从降磷角度考虑,不管是不同养殖品种,还是不同(花鲢)投放数量,水芹均具备不错的效果。水芹浮床对 TP 去除效果与水芹密度有关,密度越大效果越好^[18]。本研究的水芹种植在 10 月一次年 1 月之间(水温较低),这与低温条件下水芹浮床对富营养化水体的净化效果较好相关^[18],这些结果证实了植物浮床对磷元素的去除主要依靠植物的吸收作用,且存在诸多影响因素^[19]。基础数据表明苏州及周边地区青鱼养殖池塘 TN 超标,混养塘 TP 和 COD 超标^[20],本研究中“空心菜-水芹”轮作模式能显著降低青鱼养殖池塘 TOC、NO₃⁻-N 含量,降低苏州经济鱼混养塘 TOC、COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 含量,提示“空心菜-水芹”轮作模式适合在混养池塘进行示范推广。如果冬季采用水芹进行水质净化,经济鱼养殖池塘可能需要考虑合理施加磷肥以便于浮游植物的生长^[21]。此外,在轮作模式和植物品种选择上,可以考虑中草药(鱼腥草、薄荷 *Mentha haplocalyx* Briq. 等)、苏丹草 (*Sorghum sudanense* Stapf)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.), 并种植莲藕^[22]。

参考文献:

- [1] 胡庚东,宋超,陈家长,等. 池塘循环水养殖模式的构建及其对氮磷的去除效果[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 82-86.
HU G D, SONG C, CHEN J Z, et al. Modeling of water circulating pond aquaculture system and its N&P removal effect[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(3): 82-86.
- [2] 陈家长,孟顺龙,胡庚东,等. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 155-159.
CHEN J Z, MENG S L, HU G D, et al. Effect of *Ipomoea aquatica* cultivation on artificial floating rafts on water quality of intensive aquaculture ponds[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(2): 155-159.
- [3] 邴旭文,陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(3): 29-33.
BING X W, CHEN J Z. The control of eutrophic water in ponds by floating-bed soilless culture of plants[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21(3): 29-33.
- [4] 郑尧,邴旭文,范立民,等. 浮床栽培鱼腥草对吉富罗非鱼养殖池塘水质的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(14): 26-31.
ZHENG Y, BING X W, FAN L M, et al. *Houttuynia cordata* Thunb cultivation on floating bed affecting water quality of gift tilapia aquaculture pond [J]. Chinese

- Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 26-31.
- [5] 郑尧, 邴旭文, 裘丽萍, 等. 浮床栽培鱼腥草对吉富罗非鱼胆汁液中八种免疫因子的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1680-1685.
- ZHENG Y, BING X W, QIU L P, et al. Changes of eight biliary immune factors of GIFT tilapia after floating-bed cultivation of *Houttuynia cordata* Thunb[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(9): 1680-1685.
- [6] 史丽娜, 可小丽, 刘志刚, 等. 罗非鱼-鱼腥草共生养殖池塘沉积物菌群结构与功能特征[J]. 中国农学通报, 2015, 31(14): 64-73.
- SHI L N, KE X L, LIU Z G, et al. Effect of *Houttuynia cordata* floating-bed on the structure and function of bacterial community in the sediments of tilapia aquacultural system [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(14): 64-73.
- [7] 田敏, 朱建强, 陶玲, 等. 鱼藕轮作对池塘底质环境的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(1): 59-61, 66.
- TIAN M, ZHU J Q, TAO L, et al. Effects of fishery-lotus rotation on fishponds' sediments [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(1): 59-61, 66.
- [8] 张春雪, 陶玲, 张世羊, 等. 鱼藕轮作对池塘底泥微生物群落代谢功能的影响[J]. 淡水渔业, 2013, 43(5): 62-67.
- ZHANG C X, TAO L, ZHANG S Y, et al. Influences of fish-lotus rotation on metabolic functions of microbial communities in fishponds[J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(5): 62-67.
- [9] 梁长辉. 池塘鱼草轮作效益高[J]. 渔业致富指南, 2009(7): 36-37.
- LIANG C H. Grass-fish rotation in pond brings high economic benefit[J]. Fishery Guide to be Rich, 2009(7): 36-37.
- [10] 刘国锋, 张志勇, 严少华, 等. 大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1299-1305.
- LIU G F, ZHANG Z Y, YAN S H, et al. Purification effects of large-area planting water hyacinth on water environment of Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1299-1305.
- [11] 罗国芝, 朱泽闻, 潘云峰, 等. 生物絮凝技术在水产养殖中的应用[J]. 中国水产, 2010(2): 62-63.
- LUO G Z, ZHU Z W, PAN Y F, et al. Application of biological flocculation technology in aquaculture [J]. China Fisheries, 2010(2): 62-63.
- [12] 黄永芳, 杨秋艳, 张太平, 等. 水培条件下两种植物根系分泌特征及其与污染物去除的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 373-379.
- HUANG Y F, YANG Q Y, ZHANG T P, et al. Secretion characteristics of two plants under hydroponic culture and its relationships with pollutant removal [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 373-379.
- [13] 王珊珊, 翁沁玉, 袁檬, 等. 浮床栽培蔬菜根际脱氮微生物研究[J]. 湖南生态科学学报, 2015, 2(1): 6-10.
- WANG S S, WENG Q Y, YUAN M, et al. The research of rhizosphere microecological in floating bed cultivated swamp cabbage[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2015, 2(1): 6-10.
- [14] 宋超, 刘盼, 朱华, 等. 水芹对富营养化水体的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 145-148.
- SONG C, LIU P, ZHU H, et al. Research of purification effect on eutrophic water by *Oenanthe javanica* [J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(3): 145-148.
- [15] 周元清, 李秀珍, 唐莹莹, 等. 不同处理水芹浮床对城市河道黑臭污水的脱氮效果及其机理研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2192-2198.
- ZHOU Y Q, LI X Z, TANG Y Y, et al. Effect and mechanism of nitrogen removal in urban malodorous river using *Oenanthe javanica* floating mats [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2192-2198.
- [16] 李海英, 李文朝, 冯慕华, 等. 微曝气生态浮床水芹吸收 N P 的特性及其对系统去除 N P 贡献的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1908-1913.
- LI H Y, LI W C, FENG M H, et al. Characteristics and contribution of *Oenanthe javanica* uptake to nitrogen and phosphorus removal based on a micro-aerated ecological floating bed [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1908-1913.
- [17] 郭凯, 赵文, 董双林, 等. “海蜇-缢蛏-牙鲆-对虾”混养池塘悬浮颗粒物结构及其有机碳库储量[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1872-1880.
- GUO K, ZHAO W, DONG S L, et al. Structure of suspended particles and organic carbon storage in jellyfish-shellfish-fish-prawn polyculture ponds [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1872-1880.
- [18] 向文英, 彭颖. 重庆冬季水芹浮床对富营养化水体的修复[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5393-5398.
- XIANG W Y, PENG Y. Remediation of eutrophic water by *Oenanthe javanica* eco-floating bed in Chongqing in winter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(11): 5393-5398.
- [19] 辛在军. 水芹生态浮床净化功能影响因素与生态化学计量研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- XIN Z J. Influencing factors for the purification function of water cress floating-beds and stoichiometry [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [20] 戴修赢. 苏州地区七种养殖池塘水质及其氮、磷收支研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- DAI X Y. Studies on the water quality and nitrogen, phosphorus budget of seven types of aquaculture ponds in Suzhou region [D]. Suzhou: Soochow University, 2010.
- [21] 邓希海. 家鱼(Major Four Chinese Carps)养殖中池塘水质的调节控制[J]. 现代渔业信息, 2008, 23(7): 17-21.
- DENG X H. Controlling water quality in the pond for farming

- major four Chinese carps[J]. *Modern Fisheries Information*, 2008, 23(7): 17-21.
- [22] 陈宇顺. 涨渡湖湿地池塘鱼类养殖模式优化与外源性氮、磷污染控制的研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2006.
- CHEN Y S. Studies on pond pisciculture modes optimization and exterior nitrogen-phosphorus pollution control in Zhangduhu wetland [D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Hydrobiology), 2006.

The effect of pond pollutants removal for rotation by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and cress (*Oenanthe stolonifera*)

ZHENG Yao^{1,2}, CHEN Jiazhang^{1,2,3}, HU Gengdong^{1,2}, ZHAO Zhixiang³, MENG Shunlong^{1,2}, FAN Limin^{1,2}, SONG Chao^{1,2}, BING Xuwen^{1,2,3}

(1. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, Jiangsu, China; 2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Products on Environmental Factors (Wuxi), Ministry of Agriculture, Wuxi 214081, Jiangsu, China; 3. Wuxi Fishery College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, Jiangsu, China)

Abstract: The pollutant removal effect towards different cultivation species or quantity on the rotation model by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and cress (*Oenanthe stolonifera*) has been tested. Contents of the main water quality indexes including total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD), chlorophyll (Chl), total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), total phosphorus (TP) and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were measured. TOC, TN and TP in the sediments have also been tested. The results showed that TOC, Chl, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ significantly decreased in Ganlou herring (*Mylopharyngodon piceus*) pond before the rotation model (only planting water spinach), while TOC, COD, Chl, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP significantly decreased in Suzhou economic parental fish pond. TOC, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP significantly decreased in Ganlou herring (*Mylopharyngodon piceus*) pond after the rotation model (only planting cress), while TOC, COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP significantly decreased in Suzhou economic parental fish pond. To conclude, TOC, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP in the water and TOC, TN, TP in the sediment have been significantly reduced by this rotation model “water spinach-cress”.

Key words: water quality; sediment; rotation model; in situ remediation