

刘丽珠, 张志勇, 宋伟, 等. 凤眼莲净化塘与人工湿地组合工艺对养殖尾水的净化效能[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 389–393.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.124

# 凤眼莲净化塘与人工湿地组合工艺 对养殖尾水的净化效能

刘丽珠, 张志勇, 宋伟, 刘海琴, 王岩, 张君倩, 张迎颖

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014)

**摘要:**利用凤眼莲净化塘和人工湿地组合工艺净化规模化池塘养殖尾水, 以实现水体循环再利用和减少入太湖污染负荷。试验共设置 6 组“净化塘 + 人工湿地”, 每组由凤眼莲净化塘与茭草上行流湿地组成, 净化塘内凤眼莲的覆盖度分别是 0、45%、65%, 初始凤眼莲放养量分别为 0、40、60 kg, 每个处理设 2 个重复, 水力负荷为 800 mm/d。结果证明, 65% 覆盖度净化塘与湿地共同作用下, 进水时总氮(TN)、总磷(TP)浓度分别为 9.92、0.06 mg/L, 出水时分别降至 4.12、0.02 mg/L, 分别下降 5.80、0.04 mg/L, 去除率分别为 55.6%、63.1%, 与空白对照相比均有显著性差异( $P < 0.05$ )。不同覆盖度凤眼莲的出水 TN 浓度均达到了 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》的二级标准; 运用该循环模式不仅不会降低鱼塘的经济收益, 而且可以实现水体的循环再利用, 可有效缓解太湖的入湖污染负荷。

**关键词:**凤眼莲; 人工湿地; 养殖尾水; 净化效能; 覆盖度; 放养量; 水力负荷; 去除率

**中图分类号:** X52; S912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0389-04

大量含氮、磷等营养因子的养殖尾水排入湖泊河流会导致水体中氮、磷含量不断增加, 当其浓度远远超过水体的自净能力时就会导致水体的富营养化, 从而促使藻类大量繁殖, 水质恶化, 大量鱼类和其他生物面临死亡甚至灭绝危机。循环水养殖系统的概念, 即在水产养殖生产过程中引入尾水净化工艺, 以此来控制水质, 达到尾水循环利用的生态平衡方式<sup>[1-2]</sup>。为了达到生态平衡, 越来越多的城市和地区根据不同污染物类型, 并结合当地自然条件, 构建不同种类的尾水净化工艺, 模拟自然生态净化系统的运作机理, 更加有效地进行养殖尾水处理。

净化塘和人工湿地作为净化污水的常规方法, 净化水质效果显著, 符合养殖尾水的净化理念。净化塘成本低、便于管理, 凤眼莲具有极强的氮、磷吸收能力<sup>[3-4]</sup>, 采用凤眼莲净化水质, 不仅可以省去浮床建设费用, 还不需要反复播种或移栽, 相对于其他水生植物更易打捞<sup>[5]</sup>, 是净化水质的良好水生植物。人工湿地是人为设计建造的由基质、植物、微生物和水体等组成的复合体, 通过系统中的基质-水生植物-微生物的相互协同作用来实现对水体的净化目的。上行流湿地可以充分利用湿地空间, 占地面积相对较小但供氧好, 净化能力高。本研究采用凤眼莲净化塘和人工湿地的组合工艺对养殖尾水的氮磷净化效能进行研究, 以期对规模化池塘养殖尾

水的循环再利用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 净化塘与人工湿地的构建

试验地址设在江苏省苏州金庭大成现代农业园, 农业园位于苏州市吴中区金庭镇(原西山镇)东部的战备圩和居山圩, 金庭镇是我国淡水湖泊中最大的岛屿, 四面被太湖包围。大成现代农业园核心区占地面积约 266.7 hm<sup>2</sup>, 池塘养殖面积约占 1/3。设置 6 组“净化塘 + 人工湿地”, 每组由凤眼莲净化塘与茭草上行流湿地组成, 净化塘和人工湿地池的规格均为 6 m × 3 m × 1.5 m。净化塘内凤眼莲的覆盖度设为 3 个处理, 分别是 0、45%、65%, 有研究表明大水域种养凤眼莲的覆盖度不超过水面面积的 50% 对水体复氧没有不利影响, 因此处理考虑设置了 45%、65% 不同覆盖度凤眼莲<sup>[6-7]</sup>; 初始凤眼莲放养量分别为 0、40、60 kg, 各净化塘内放置 1.6 m × 2.4 m 的白色围栏 3 个(图 1), 凤眼莲均放入各围栏内, 每个处理设 2 个重复。净化塘的出水流入茭草上行流湿地, 茭草上行流湿地自下而上铺设砾石 40 cm、黄沙 30 cm, 漫水 30 cm, 种植茭草 12 kg, 水力负荷为 800 mm/d。大成农业园内设有环形河沟, 养殖废水排入河沟内用水泵打入“净化塘 + 人工湿地”内作为试验用水。试验从 2012 年 8 月 30 日持续到 10 月 8 日, 试验期间人工湿地采用间歇流, 通过自动定时开关控制水泵的开关时间。

### 1.2 采样与监测

如图 1 所示, 净化塘采用沿程采样, 从进水(采样点 1)、2 m 处(采样点 2)、4 m 处(采样点 3)、出水口(采样点 4)共设置 4 个采样点, 上行流人工湿地池在出水面设置 2 个采样点(采样点 5、采样点 6)。水样每 4 d 采集 1 次, 测定水质指标, 水样中的总氮(TN)、总磷(TP)浓度利用 Skalar 公司的 SAN++ 流动分析仪测定。现场测定水温、气温、pH 值和溶氧

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(编号: 201203050-6); 江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(12)5054]; 江苏省科技支撑计划(编号: BE2013436)。

作者简介: 刘丽珠(1987—), 女, 江苏张家港人, 硕士, 研究实习员。

Tel: (025)84390581; E-mail: liulizhu198798@sina.com。

通信作者: 张迎颖, 副研究员, 主要从事富营养化湖泊水生植物生态修复研究。Tel: (025)84390581; E-mail: fly8006@163.com。

量(DO),测定时间为每天 06:00—08:00,水温、气温利用温度计测定;pH 值采用 PHB-5 笔式 pH 计测定;溶氧量(DO)采用 JPB2607 型便携式溶氧仪测定。凤眼莲植物样试验初始

和结束各采集 1 次,植株采用硫酸和过氧化氢煮沸,植株全氮含量采用凯氏定氮仪测定;植株全磷含量采用钼锑抗比色法测定。

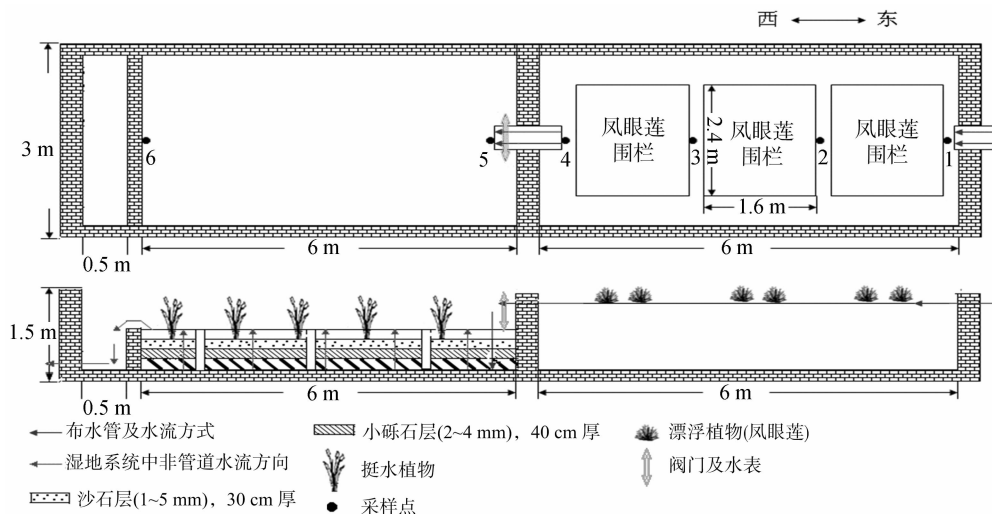


图1 净化塘与人工湿地系统垂直和平面图示

### 1.3 数据处理与统计分析

试验数据[除 pH 值、总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度和浮氧量数据外]经 Excel 处理后应用 SPSS 13.0 进行统计分析,差异显著性用 SPSS 软件中的 One-Way ANOVA 进行单因素方差分析,选用 Duncan's 法进行多重比较。

污染物的去除率  $R$  按下列公式计算:

$$R = (C_i - C_e) / C_i \times 100\%$$

式中: $C_i$ 、 $C_e$  分别为进水、出水的质量浓度,mg/L。

按下式计算单位面积植物吸收的氮或者磷总量  $m$ :

$$m = (m_2 \times L_2 \times N_2 - m_1 \times L_1 \times N_1) / S$$

式中: $m_2$  为植物的收获期的鲜质量; $L_2$  为收获期植物的干物质含量; $N_2$  为收获期植株干物质中氮或者磷的含量; $m_1$  植物初始鲜质量; $L_1$  为植物初始干物质含量; $N_1$  为初始植物干物质氮或磷的含量; $S$  为净化塘水面面积。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同凤眼莲覆盖度对水体 pH 值与溶氧量的影响

图 2 为不同覆盖度凤眼莲净化塘每次采样所测得根际溶氧的平均值(净化塘水体)。从整个试验周期来看,相同周期内不同覆盖度净化塘溶氧量变化趋势类似,不同处理的溶氧量均出现先下降后缓慢上升的趋势。与空白对照相比,种养凤眼莲的净化塘溶氧量差异较大,65% 覆盖度净化塘呈现明显差异,种养凤眼莲的处理之间不存在显著性差异,说明凤眼莲的生长明显降低了水体中的溶氧量,这主要是由于凤眼莲漂浮在水面上,一定程度上阻碍了水体中的溶解氧与大气的交换<sup>[8-9]</sup>,另外凤眼莲根系的呼吸作用也会消耗水体中的溶氧量。

由图 3 可知,凤眼莲覆盖度为 0 的净化塘水体 pH 值相对较高,为 7.4~8.8;覆盖度为 45% 的净化塘 pH 值居中,为 7.4~8.9;覆盖度为 65% 的净化塘 pH 值相对较低,为 7.5~8.7,平均值较空白对照下降 0.15。种养凤眼莲可使养殖尾水的 pH 值略有下降,维持在中性水平。

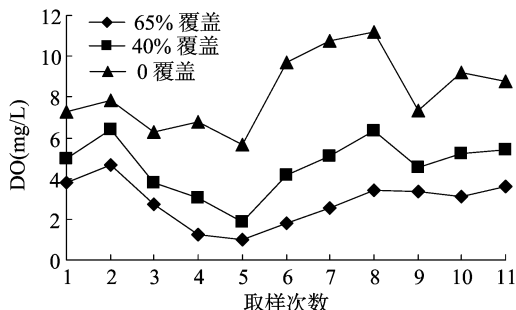


图2 不同处理水体溶氧量的变化

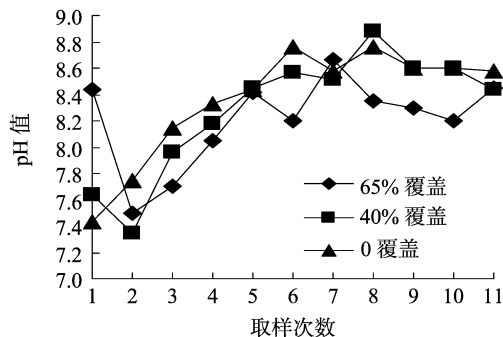


图3 不同处理水体 pH 值的变化

### 2.2 不同凤眼莲覆盖度对水体氮磷的影响

由于养殖废水来自园内各大小鱼塘,所以各净化塘每天初始进水中的 TN、TP 浓度不尽相同。由图 4、图 5 可见,同一天同一处理出水中 TN、TP 浓度与进水相比大幅下降。凤眼莲存在的水体中,从采样点 1 至采样点 4,同一天同一处理的 TN、TP 浓度逐渐降低,这说明凤眼莲对水体具有良好的净化过滤效果,而空白对照无规律。采样点 4 与采样点 5 之间的差值较大,说明上行流人工湿地具有良好的净化能力,采样点 5 和采样点 6 位于上行流湿地的水面,为最终净化的出水,其氮磷含量基本一致。65% 覆盖度凤眼莲平均进水的 TN、TP 含量分别为 9.92、0.06 mg/L,出水时分别降至 4.12、

0.02 mg/L, TN、TP 含量分别下降 5.8、0.04 mg/L。45% 覆盖度风眼莲有相似的作用, 净化能力略差于 65% 覆盖度, 二者不存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。不同覆盖度风眼莲的出水 TN 浓度均达到了 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》的二级标准(进水口 TP 浓度较低, 约 0.06 mg/L, 未超标)。

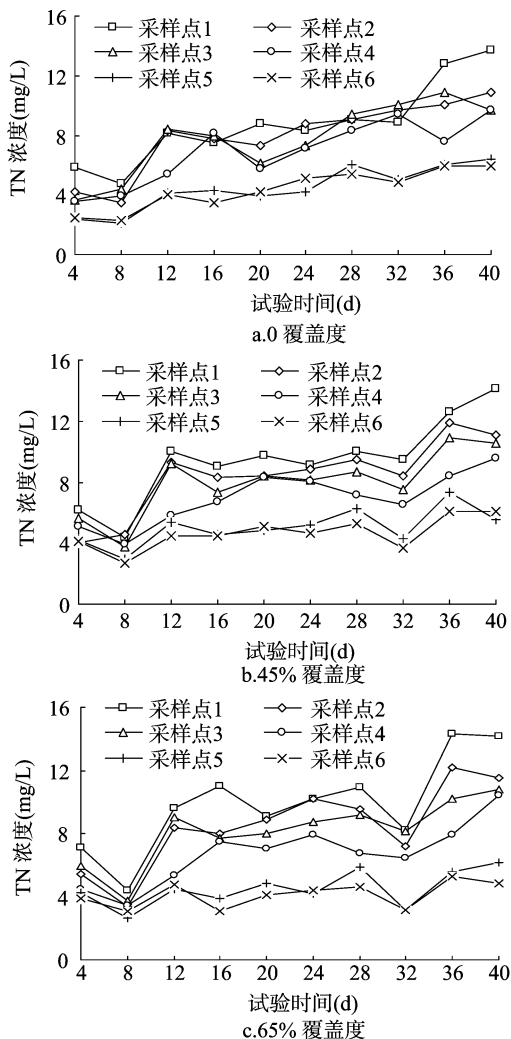


图4 净化塘与人工湿地组合系统总氮含量的变化情况

由图 6 可知, 在不同风眼莲覆盖度下, 净化塘系统对养殖尾水中 TN、TP 均有较好的去除效果, TN、TP 的去除率分别为 24.5% ~ 31.0%、40.1% ~ 41.4%; 在净化塘与人工湿地系统共同作用下, 对应 TN、TP 的去除率提高, 分别为 48.8% ~ 55.6%、60.8% ~ 63.1%, 65% 覆盖度的去除率与空白对照相比均有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。45% 覆盖度的氮去除率与空白比虽然差异不显著, 但是也有所增加, 磷去除率与对照比差异显著。

### 2.3 不同风眼莲覆盖度下风眼莲吸收 N、P 的变化

植物生长状况间接反映了它的耐污力和对环境的适应力, 这也是植物用于净化水质的备选标准之一。由表 1 可见, 风眼莲的株高与初始相比略有降低, 根系长度也有所降低, 可能是由植物生长环境的改变导致的, 也可能是因为植株新陈代谢老叶枯死, 嫩叶长出, 生物量不断增加而单株的生物量减小。随着净化流程的进行, 水体中氮、磷浓度降低, 使得植株

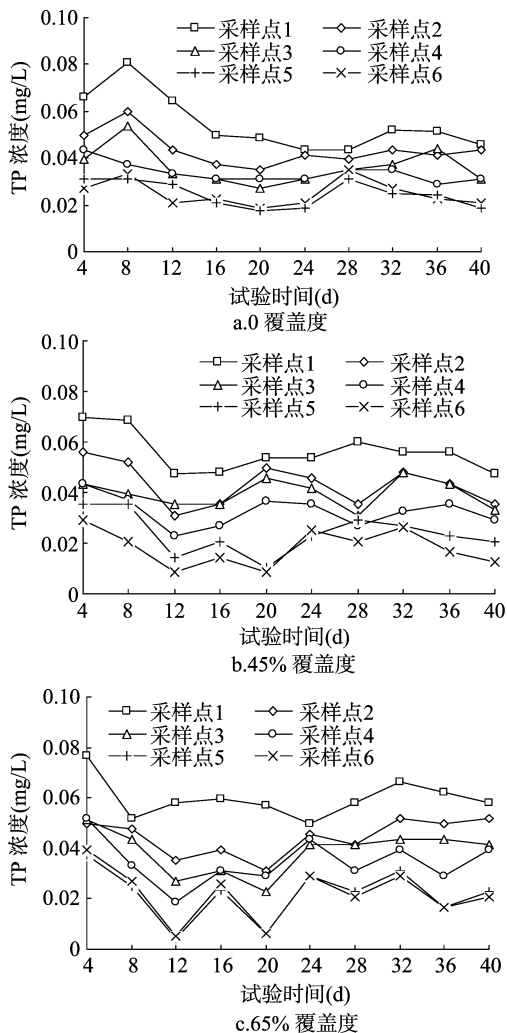


图5 净化塘与人工湿地组合系统总磷含量的变化情况

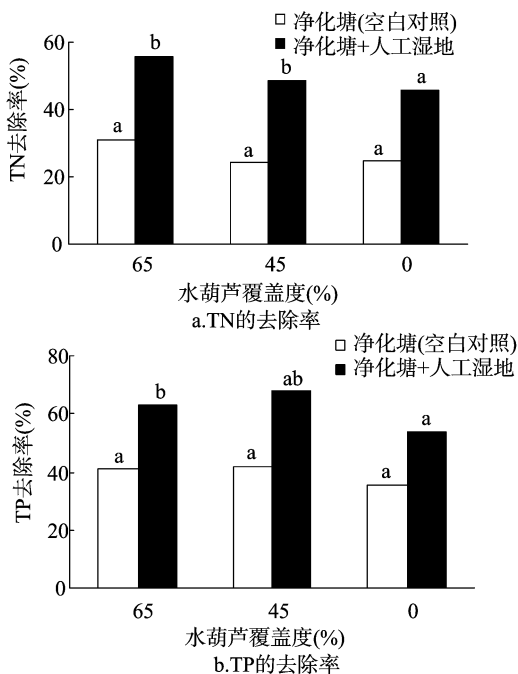


图6 不同风眼莲覆盖度对氮磷去除效果的影响

新长出的叶片颜色较浅,叶绿素含量较低。凤眼莲净化富营养化水体的效果首先取决于生物量,通过计算地上部生物干质量可以发现,65%覆盖度地上部单位面积生物干质量与初始相比差异显著,增加 104%;45%覆盖度与初始相比增加

35%,而地上部是凤眼莲植株体内积累氮磷的主要部位。试验期间单位面积地下部生物干质量也明显增加,通过计算可知 65%、45%覆盖度地下部生物干质量在收获时分别是初始的 126%、135%。

表 1 不同处理下凤眼莲的生长特性

不同覆盖度 (%)	株高 (cm)	根长 (cm)	叶绿素含量 (SPAD 值)	地上部生物干质量 (kg/m <sup>2</sup> )	地下部生物干质量 (kg/m <sup>2</sup> )	总生物干质量 (kg/m <sup>2</sup> )
0(初始)	46.3a	39.2a	52.0a	0.23a	0.23a	0.46a
65	45.8a	37.1a	48.4a	0.47a	0.29a	0.76a
45	43.2a	35.4a	46.1a	0.31a	0.31a	0.62a

由表 2 可知,不同覆盖度凤眼莲 N 平均浓度和初始相比无太大差异;而整株的 P 平均浓度均比初始放养略低。不同覆盖度凤眼莲整株的 N、P 平均浓度分别在 19.90~20.24、1.47~1.68 mg/g 之间,其 N 浓度远高于 P 含量。依据凤眼莲不同覆盖度地上部、地下部生物量干质量及其组织内的 N、P 养分浓度,可以计算地上、地下部的 N、P 吸收总量,并相加求得凤眼莲植株的 N、P 吸收总量。在整个试验期间,45%、65%覆盖度凤眼莲对 N 的吸收总量平均分别为 26.13、72.93 g/m<sup>2</sup>,对 P 的吸收总量分别为 3.22、4.89 g/m<sup>2</sup>,随覆盖度的增加而升高。

表 2 不同处理中凤眼莲的氮磷浓度

不同覆盖度 (%)	整株浓度(mg/g)		总吸收量(g/m <sup>2</sup> )	
	N	P	N	P
0(初始)	20.06a	1.84a		
65	20.24a	1.68a	2.93a	4.89a
45	19.90a	1.47a	26.13a	3.22a

3 结论与讨论

pH 值、溶氧量是表征水体化学环境的重要指标,也是地表水环境质量标准的基本项目。在本试验过程中,有凤眼莲覆盖的净化塘 pH 值比较稳定且低于对照,有助于浮游动物和底栖动物的繁殖与生长<sup>[10-11]</sup>。由于 pH 值偏低,水体中 H<sup>+</sup> 浓度升高,会促使水体中溶氧量下降。有文献显示,水生植物对水体中的 pH 值有一定的调节作用,当水体中 pH 值较大时会促使水生植物根系分泌有机酸来调节水体中酸碱平衡<sup>[12]</sup>。此外,凤眼莲的夜间呼吸作用和微生物代谢作用也是使处理水体中 pH 值下降的主要原因<sup>[13]</sup>。

在空白对照处理中,藻类有一定的繁殖,这会导致水体中光合作用增强,大量消耗溶解于水体中的 CO<sub>2</sub>,打破水体中原有的碳酸盐的平衡,使水体中 H<sup>+</sup> 浓度降低,pH 值升高;另外,空白对照处理中溶氧量相对较高,这就促进 O<sub>2</sub> 与 H<sup>+</sup> 结合生成水的过程,从而降低了水体中 H<sup>+</sup> 浓度,导致 pH 值升高。

人工湿地和净化塘具有特别的优势,不仅可以处理低浓度污水,同时还可以隐藏在生态园的绿地、花园中,提高生态园景观环境的协调性和美观性。本试验着重利用凤眼莲净化塘和人工湿地组合工艺对养殖尾水中 N、P 等营养因子的去除,以达到改善水质的目的。本试验结果证明,65%覆盖度净化塘与湿地共同作用下 TN、TP 的去除率分别为 55.6%、63.1%,与空白对照相比均有显著性差异(P<0.05)。不同覆盖度凤眼莲出水中的 TN 浓度均达到了 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》的二级标准(进水口中的 TP 浓

度为 0.06 mg/L,未超标)。凤眼莲能吸收大量的 N、P 以供自身生长需要,通过适宜覆盖度的凤眼莲净化塘结合人工湿地实现了养殖水体的净化。

湿地系统中 TN 的去除机制是多样的,主要包括挥发硝化与反硝化植物摄取和基质吸附<sup>[4]</sup>,许多研究表明微生物的硝化与反硝化是脱氮的主要途径。人工湿地系统中磷的去除由基质填料的物理化学作用、植物的摄取和微生物的同化作用共同完成<sup>[3]</sup>,而其中广泛认同的主要去除机制是填料对磷的物化吸附和化学沉降作用。净化塘的净化机理主要是水生植物的作用起主导。凤眼莲净化塘对水体氮磷的净化效果较好,其原因包括 2 个方面:一是凤眼莲生物量增加较多,吸收了水体中的氮素合成自身的营养物质;二是凤眼莲根系发达,有利于微生物附着,发生硝化反硝化反应,有助于水体脱氮<sup>[6]</sup>。另外,凤眼莲在腐烂前打捞上岸可以避免其吸收的氮磷重新释放回水体中。

目前,净化塘和人工湿地处理机理虽然已部分得到认可,但仍有许多问题须解决,如凤眼莲的资源化利用以及人工湿地的植物选取和填料更替等。因此,不断优化养殖尾水处理方法,才能使该循环模式在池塘养殖尾水净化中发挥更佳的效果。

参考文献:

[1] Davis D A, Arnold C R. The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp[J]. Aquacultural Engineering, 1998, 17(3): 193-211.

[2] van Rijn J. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review[J]. Aquaculture, 1996, 139(3/4): 181-201.

[3] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 152-157.

[4] Zhang J, Zhou Q, He R. Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free water surface constructed wetland[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 98-101.

[5] Malik A. Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth[J]. Environment International, 2007, 33(1): 122-138.

[6] 高岩, 易能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N<sub>2</sub>O 的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 349-359.

[7] Iamchaturapatr J, Yi S W, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow(VFS) constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(3): 287-293.

许国春,刘欣,王强盛,等. 稻鸭种养生态系统的碳氮效应及其循环特征[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):393-396.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.125

# 稻鸭种养生态系统的碳氮效应及其循环特征

许国春<sup>1</sup>, 刘欣<sup>1</sup>, 王强盛<sup>1</sup>, 甄若宏<sup>2</sup>, 郑建初<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学农学院, 江苏南京 210095; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014)

**摘要:**稻田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,其碳氮吸收转化对全球碳氮循环具有不可忽视的作用。稻鸭种养生态系统由于鸭在稻田营养和时空生态位的添加,使稻田生态系统的碳氮循环更趋于复杂化、稳定性和可控性。在概述稻鸭种养生态系统碳氮循环特征的基础上,阐明稻鸭种养生态系统的固碳效益和氮素利用效率,对稻鸭共作生态系统的碳氮代谢及高效利用前景进行展望。

**关键词:**稻鸭共作;碳氮循环特征;氮素利用;生态系统;固碳效益

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0393-04

工业革命以来,由于化工、石油等燃料大量使用、森林与草地过度开垦等原因,造成温室气体特别是 CO<sub>2</sub> 浓度剧增,地球温室效应增加,导致长期的全球气候变化<sup>[1-2]</sup>。目前,农业生产已成为温室气体重要排放源,再加上人口快速增长带来的粮食需求大量增加,使未来 20 年农田温室气体的排放量将有所增加<sup>[3]</sup>。中国是全球水稻播种面积第二大国和世界最大的稻米生产国,面临稻田温室气体增排而导致全球温度升高的严峻形势。

水稻土是有机碳含量水平较高、当前固碳趋势明显且固碳潜力较大的特色耕作土壤<sup>[4]</sup>。稻田农业固碳与碳循环研究和整个农业系统的可持续发展息息相关。氮肥是农田生态系统人为投入量最大的农用化学品,稻田氮素污染主要包括径流污染、气态污染、渗漏污染等。由于氮污染具有发生时间的随机性、发生方式的间歇性、机理过程的复杂性、排放途径及排放量的不确定性、污染负荷时空变异性和监测与控制的困难性等特点<sup>[5]</sup>,进入环境的氮影响了社会经济的可持续发

展和人类健康<sup>[6]</sup>,生态系统功能被削弱,流域水环境和水资源严重恶化,造成水体的富营养化。稻鸭共作生态系统作为一项种养结合、降本增效的生态农业技术,具有刺激水稻生长、促进养分物质循环和能量转化的作用<sup>[7]</sup>,本研究在概述稻鸭种养生态系统碳氮循环特征的基础上,阐明稻鸭种养生态系统的固碳效益和氮素利用效率,以更好地提高稻鸭共作生态技术在稻田固氮减排及养分循环利用上的应用效果。

## 1 稻鸭种养生态系统碳氮循环特征

### 1.1 碳循环特征

碳是地球上生命有机体的关键成分,以二氧化碳、碳酸盐及有机化合物等多种形式在环境中存在,碳循环是生物圈健康发展的重要标志<sup>[8]</sup>。在农田生态系统中,农作物通过光合作用从大气中吸收二氧化碳并固定在作物体内,作物生长期间的凋落物、收获后的秸秆、根茬及根系释放的有机物质可以向土壤输入有机碳,有机肥和化肥中的碳量也是土壤碳的重要来源。作物和土壤通过呼吸作用向大气转移碳量,碳素还可沿着食物链流向家禽、家畜和人类,并通过人畜粪便及残留物重新进入系统<sup>[9]</sup>。

稻鸭种养生态系统的碳素循环发生在水稻-鸭-土壤(含水体层)界面下(图 1),受施肥制度、饲料、灌溉水等田间管理因素影响,并受到人为的补给和控制<sup>[10]</sup>。鸭的介入及其田间活动如喂食饲料、吃食杂草及害虫、排泄粪便、鸭的呼吸等,影响整个稻田系统的碳循环。有研究表明,稻鸭共作对杂草的防除效应达到 96.1%,对稻飞虱的综合防效达到

收稿日期:2015-05-10

基金项目:中央财政农业技术推广项目[编号: TG(14)027、TG(14)013];江苏省科技支撑重大项目(编号: BE2013355);江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(14)4072];江苏省农业三新工程(编号: SXGC[2015]112、SXGC[2014]128、SXGC[2013]335)。

作者简介:许国春(1991—),男,福建龙岩人,硕士,从事作物生理生态及农业生态研究。E-mail: aefslab@163.com。

通信作者:王强盛,博士,副教授,从事作物高效栽培及生态循环农业研究。E-mail: qswang@njau.edu.cn。

[8] Hunt R J, Christiansen I H. Understanding dissolved oxygen in streams: information kit [M]. Townsville: CRC Sugar Technical Publication, 2000.

[9] 张迎颖,严少华,李小铭,等. 不同 pH 下水葫芦与紫根水葫芦生长特性与净化效能对比研究[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 4317-4325.

[10] 刘国锋,刘海琴,张志勇,等. 大水面放养凤眼莲对底栖动物群落结构及其生物量的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2925-2931.

[11] Wang Z, Zhang Z, Zhang J, et al. Large-scale utilization of water hyacinth for nutrient removal in Lake Dianchi in China: the effects on the water quality, macrozoobenthos and zooplankton [J]. Chemosphere, 2012, 89(10): 1255-1261.

[12] 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.

[13] Kadlec R H. The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing [J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 126-141.