

茭白-鸭共作系统中氮平衡及经济效益分析

张家宏¹, 王桂良², 王守红¹, 寇祥明², 杨建春¹, 徐 荣², 朱凌宇², 韩光明²,
毕建花², 唐鹤军³

(1.江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; 2.江苏省生态农业工程技术研究中心, 江苏 扬州 225007; 3.扬州龙兴生态农业发展有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘 要:分析了单作茭白(CK)、茭白田放养鸭 20 只·667 m²(D20)、25 只·667 m²(D25)、30 只·667 m²(D30)等不同共作系统中氮素输入、输出与盈余(盈余=输入-输出),以及经济效益情况。结果表明:茭白-鸭共作系统中茭白平均产量为 1 332.41 kg·667 m²,比单作茭白增产 26.31%。单作茭白总氮输入为 22.27 kg N·667 m²,其中化肥氮输入占到 89.10%,产品氮输出为 5.00 kg N·667 m²,占总氮输入的 22.45%,氮盈余为 17.27 kg N·667 m²,占总氮输入的 77.55%,土壤氮残留为 7.11 kg N·667 m²,损失为 10.16 kg N·667 m²;茭白-鸭共作系统总氮输入平均为 23.72 kg N·667 m²,其中化肥氮输入占 65.13%,产品氮输出平均为 7.65 kg N·667 m²,占总氮输入的 32.24%,氮盈余平均为 16.07 kg N·667 m²,占总氮输入的 67.76%,土壤氮残留为 7.18 kg N·667 m²,损失为 8.89 kg N·667 m²。茭白-鸭共作系统投入成本平均为 3 114 元·667 m²,比单作茭白高 84.59%,主要是鸭饲料、围网、鸭舍等成本增加。茭白-鸭共作系统产品产值平均为 6 568 元·667 m²,比单作茭白高 55.64%。D25 处理经济效益(经济效益=产品产值-投入成本)最高为 3 589 元·667 m²,比 CK 处理高 41.69%。综合考虑氮平衡和经济效益,本试验条件下,茭白田放养鸭 25 只·667 m²的共作系统的经济效益较高,并且氮素盈余和损失较少,可降低对环境的污染风险。

关键词:茭白-鸭共作系统;氮平衡;经济效益

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)05-0498-08

doi: 10.13254/j.jare.2015.0029

Nitrogen Balance and Economic Benefit in *Zizania latifolia*-Duck Mutual Ecosystem

ZHANG Jia-hong¹, WANG Gui-liang², WANG Shou-hong¹, KOU Xiang-ming², YANG Jian-chun¹, XU Rong², ZHU Ling-yu², HAN Guang-ming², BI Jian-hua², TANG He-jun³

(1.Institute of Agricultural Science of Lixiahe District in Jiangsu, Yangzhou 225007, China; 2.Research Center for Eco-agricultural Engineering and Technology of Jiangsu Province, Yangzhou 225007, China; 3.Yangzhou Longxing Ecological Agriculture Development Co. LTD, Yangzhou 225007, China)

Abstract: Nitrogen (N) input, N output, N surplus (N surplus=N input-N output), and economic benefit under different ecological systems were analyzed, including *Zizania latifolia* monoculture ecosystem and three *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystems such as with 20 ducks per 667 m² (D20), 25 ducks per 667 m² (D25) and 30 ducks per 667 m² (D30). The results showed that the average yield of *Zizania latifolia* for three mutual ecosystems was 1 332.41 kg·667 m², 26.31% higher than that for monoculture ecosystem. For *Zizania latifolia* monoculture ecosystem, total N input was 22.27 kg N·667 m², and chemical fertilizer N was accounted for 89.10%, the N output by the harvest was 5.00 kg N·667 m², 22.45% of total N input, N surplus was 17.27 kg N·667 m², 77.55% of total N input. For three mutual ecosystems, the average total N input was 23.72 kg N·667 m², and chemical fertilizer N was accounted for 65.13%, the average N output by the harvest of *Zizania latifolia* and duck mutual ecosystem was 7.65 kg N·667 m², 32.24% of total N input, the average N surplus was 16.07 kg N·667 m², 67.76% of total N input. Because of the costs of duck feed, fence and duck shed, the average input cost for three *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystems was 3 114 yuan·667 m², 84.59% higher than that for *Zizania latifolia* monoculture ecosystem. The average economic income for three *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystems was 6 568 yuan·667 m², 55.64% higher than that for *Zizania latifolia* monoculture ecosystem. For D25 treatment, the economic benefit (economic benefit=economic income-input cost) was the highest as 3 589 yuan·667 m², 41.69% higher than that for *Zizania latifolia* monoculture ecosystem. In view of N balance and economic benefit, *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem with 25 ducks per 667 m² had lower N surplus with less environmental risk, and higher economic benefit.

Keywords: *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem; N balance; economic benefit

收稿日期:2015-01-29

基金项目:江苏省自主创新资金项目(CX13(3048));江苏省农业支撑计划项目(BE2014360);江苏省水产三新工程项目(Y2013-28)

作者简介:张家宏(1965—),男,江苏高邮人,研究员,主要从事生态农业工程技术研究与应用工作。E-mail: yzzhangjh@126.com

茭白-鸭共作系统是充分利用互利共生、生态位和食物链等生态学原理,以种植茭白为中心,构建的家鸭茭白田间围网养殖的种养生态系统,是对我国传统水生蔬菜生产模式的创新与发展^[1-3]。该系统以茭白田为鸭子提供生长水域空间以及杂草、水生昆虫和有机碎屑等天然饲料生物,鸭子为茭白田除草、食虫、耘土、增肥等,实现以田养鸭,以鸭促茭,以鸭护茭,使鸭和茭白共栖生长^[3-5]。茭白-鸭共作是江苏里下河地区循环农业发展的重要模式之一,但目前的研究主要集中在茭白-鸭共作对茭白产量和品质的影响、病虫害的控制效果、经济效益等方面^[2-5],而有关该系统中环境方面的研究极少。研究氮素平衡是评价系统中氮肥投入对环境影响的主要方法之一^[6]。研究认为,当农田系统中氮素输入量高于输出量时,所盈余的氮素很容易通过氨挥发、淋洗或硝化-反硝化等途径逸出土壤-作物体系,造成对环境的危害^[7-13]。另外,选择最佳的共作鸭密度是优化茭白-鸭共作系统的关键。研究认为,共作鸭密度过大,容易对茭白造成伤害、无法节省养鸭饲料、会对环境造成一定污染的可能;共作鸭密度过小,则无法起到鸭的除虫防病、除草、施肥和中耕浑水的效果^[3,5,13]。因此,为了进一步了解并优化茭白-鸭共作系统,设计了茭白与不同密度鸭共作试验,分析各共作系统中氮素平衡以及经济效益情况,为该生产模式的推广应用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2014 年在扬州市江都区小纪镇纪西村(32°37'23"N,119°44'46"E)进行,该地区属亚热带湿润气候区,季风显著,四季分明,夏季炎热多雨,冬季凉爽干燥,平均海拔 5 m。多年平均气温 14.9℃,最高气温 39.1℃,最低气温-8℃。多年平均降水量为 978.7 mm。年平均日照 2 140 h,年无霜期 220 d。供试土壤为潮土,基础土样(0~20 cm)pH 5.68、有机质 27.8 g·kg⁻¹、全氮 2.9 g·kg⁻¹、碱解氮 187.3 mg·kg⁻¹、速效磷 21.6 mg·kg⁻¹、速效钾 104.5 mg·kg⁻¹。

试验共设置 4 个处理:单作茭白(CK)、茭白田放养鸭 20 只·667 m⁻²(D20)、茭白田放养鸭 25 只·667 m⁻²(D25)、茭白田放养鸭 30 只·667 m⁻²(D30),每处理重复 3 次,随机区组排列,小区面积为 700 m²。各处理纯 N 总投入相同(表 1),CK 处理施肥方式与当地农民习惯一致,基肥(2014 年 4 月 5 日)和分蘖肥(2014 年 5 月 5 日)分别施用尿素 6.9 kg N·667 m⁻²和 9.2 kg N·

表 1 各处理氮素投入量(kg N·667 m⁻²)

Table 1 N application rate in different treatments (kg N·667 m⁻²)

处理	基肥	分蘖肥	孕茭肥	鸭粪	累计
CK	6.9	9.2	3.8	0	19.9
D20	6.9	6.7	2.7	3.5	19.9
D25	6.9	6.1	2.5	4.4	19.9
D30	6.9	5.4	2.2	5.3	19.9

667 m⁻²,孕茭肥(2014 年 8 月 9 日)施用复合肥 3.8 kg N·667 m⁻²。D20、D25 和 D30 处理基肥与 CK 处理一致,考虑到茭白-鸭共作期鸭粪对分蘖期和孕茭期需 N 的贡献,本研究估算了鸭粪的 N 含量,如公式 1~公式 3:

$$\text{鸭粪 N} = \text{饲料 N} - \text{成鸭固 N} \quad (1)$$

$$\text{饲料 N} = \text{成鸭单重} \times \text{放养密度} \times \text{料肉比} \times \text{饲料 N 含量} \quad (2)$$

$$\text{成鸭固 N} = \text{成鸭单重} \times \text{放养密度} \times \text{成鸭 N 含量} \quad (3)$$

参考文献[14-16]有关共作或混养系统中鸭的相关研究结果,成鸭单重为 2.22 kg·只⁻¹、成鸭 N 含量为 2.5%、料肉比为 3.85,鸭饲料 N 含量通过凯氏定氮法测定为 2.7%。再根据 CK 处理中分蘖肥和孕茭肥 N 投入比例,扣除鸭粪供 N 量,设计 D20、D25 和 D30 处理分蘖肥和孕茭肥施 N 量(表 1)。尿素含 N 量为 46%,复合肥含氮量为 15%。

小区之间做泥埂隔离,为了防止鸭子在小区间乱窜,田埂四周用尼龙网围栏,每隔 2~3 m 打 1 根桩固定,围网下端埋入土中,地上网高 50 cm 左右。在茭白-鸭共作田块空地按 5~6 只·m²搭建简易鸭舍。鸭舍四周用竹、木围筑,石棉瓦盖顶,外围再用尼龙网围起。茭白种株平均每株带 3~5 个分蘖,剪去叶片,保留叶鞘长 15~25 cm。种株于 2014 年 4 月 4 日移栽,以 45°斜插入土,确保根茎和分蘖基部在土下,分蘖苗芽稍露出水面;行距 0.9 m、株距 0.4 m。种株返青后,及时补齐缺棵。分蘖苗高 15~20 cm 时,及时去除瘦弱、密集的分蘖,每株保持有效分蘖 5~8 个,并在株丛中间压一块泥,使植株分蘖均匀分布,通风透光。茭白种株栽植后至返青前,田间水层保持 3~4 cm;分蘖前期保持 5~7 cm,以后逐步加深到 10~15 cm;孕茭期需加深到 20 cm 以上,但不能超过茭白露白处。

2014 年 5 月 20 日,将雏鸭放入茭白田活动觅食。起初 3 d,雏鸭需每日喂食 3 次,即早、中、晚各 1 次。每只鸭每日饲料喂食 150 g 左右。3 d 后,随着雏鸭下田自行觅食,喂食次数与数量宜逐渐减少,具体次数、数量可根据茭白田内杂草与水生小动物数量及

鸭的大小而定。傍晚将鸭集中赶入田头鸭舍过夜。经常派专人在田间巡逻,防止天敌侵扰鸭。鸭-茭白共作期间,茭白田里不断水,不搁田。鸭于 2014 年 8 月 1 日收获。

茭白种苗选择当地广泛采用的耐肥、抗病、优质、高产的短日照六安茭品种。鸭苗选择当地高邮麻鸭,其体小灵活、生活力强、田间活动时间长、嗜食野性生物、能生产出高品质鸭肉和蛋品、繁殖力强。

1.2 样品采集和测定

1.2.1 茭白与鸭产量

试验于 2014 年 9 月 15 日开始每隔 1 d 采收 1 次茭白,10 月 9 日结束,共计采收 13 次。每次采摘小区内所有露白的茭白肉质茎称重,最后统计每小区的各次称重之和,折合成单位面积产量;饲养鸭约 12 周龄时收获(2014 年 8 月 1 日),于中午喂食时把鸭圈在鸭舍中,待鸭空腹 2 h 后,记录每个小区中每只鸭重。

1.2.2 茭白、鸭和饲料 N 含量

茭白移栽前,选择长势均匀的 10 株茭白苗,清洗后装入信封袋并记录编号,在 105 ℃烘箱中杀青 30 min 后降至 80 ℃烘干称重,之后整株粉碎后用于测定 N 含量。收获期于每个小区按“S”形状,用标签标记 5 株长势均匀的茭白植株,用于测定茭白 N 含量。每次每株采收的肉质茎切成片状装袋编号,最后一次采收肉质茎的同时取茭白地上部,用剪刀将各个分蘖在株丛的着生处分割下来,并按每个植株各个分蘖的叶片和短缩茎分别装袋编号,所有样品在 105 ℃烘箱中杀青 30 min 后降至 80 ℃烘干称重,之后粉碎测定 N 含量。根据各部位干重和 N 含量计算茭白苗输入 N 和收获期茭白输出 N。

雏鸭放入茭白田及成鸭出栏时,分别挑选 3 只体重接近平均体重的试验鸭屠宰,用于测定鸭 N 含量。鸭采用颈椎错位法致死,屠宰分为鸭躯干(包括骨、皮、内脏等)、消化道内容物和鸭毛,分别称重。鸭躯干立即置于-20 ℃冷藏箱冷冻,之后取冷冻鸭用刀切碎后装入磁盘中,105 ℃烘 15 min 以灭菌,然后 80 ℃烘干称重,之后粉碎用于测定鸭躯干 N 含量;消化道内容物和鸭毛,直接进行灭菌烘干称重测定其 N 含量。鸭躯干、消化道内容物和鸭毛 N 含量之和为鸭 N 含量。从每袋鸭饲料中随机采集 3 个样品称鲜重,再于 80 ℃烘干称重,之后粉碎测定 N 含量。

1.2.3 土壤矿质氮含量

土壤样品分别于茭白移栽前和收获后于每个小区按“S”形状采集 0~20、20~40 cm 新鲜土壤,土壤取

回后一部分用 0.01 mol·L⁻² CaCl₂ 浸提,用连续流动分析仪(TRAACS2000)测定土壤矿质氮(硝态氮和铵态氮)含量,另取一部分土壤用烘干法测定含水量。

所有茭白、鸭和饲料样品消化采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法,全 N 测定采用凯氏定氮法。土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 值均采用常规方法测定^[17]。

1.3 数据处理和分析

图 1 表明茭白-鸭共作系统中氮素平衡情况,其中系统氮素输入包括化肥 N、鸭饲料 N、茭白苗和鸭苗带入 N、大气干湿沉降 N;系统氮素输出包括茭白和鸭收获输出 N;系统氮素盈余表示系统氮素输入多余氮素输出的部分,其中包括逃逸到环境中的 N 和残留在土壤中的 N。具体计算方法,如公式 4~公式 8:

$$\text{氮盈余}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{氮输入} - \text{氮输出} = (\text{化肥} + \text{饲料} + \text{茭白苗} + \text{鸭苗} + \text{大气沉降}) - (\text{茭白} + \text{鸭}) \quad (4)$$

$$\text{化肥 N 输入比}(\%) = \text{化肥 N} / \text{氮输入} \quad (5)$$

$$\text{茭白 N 输出比}(\%) = \text{茭白 N} / \text{氮输出} \quad (6)$$

随着矿物燃料燃烧、化学氮肥的生产和使用等人类活动向大气中排放的氮素化合物激增,大气氮素沉降成为农田氮素来源的重要途径^[18-19]。根据参考文献[20]有关长三角地区大气氮沉降研究结果,定义本试验中茭白生长期氮沉降值为 2.2 kg N·667 m⁻²。

$$\text{氮残留}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{矿质氮残留} + \text{有机氮残留} \quad (7)$$

$$\text{矿质氮残留}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{收获后土壤矿质氮累积量} - \text{移栽前土壤矿质氮累积量} \quad (7.1)$$

$$\text{土壤矿质氮累积量}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{土壤硝态氮累积量} + \text{土壤铵态氮累积量} \quad (7.2)$$

$$\text{土壤硝态氮累积量}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{土层厚度} \times \text{土壤容重} \times \text{土壤硝态氮含量} \quad (7.3)$$

$$\text{土壤有机氮累积量}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{土壤全氮累积量} - \text{土壤矿质氮累积量} \quad (7.4)$$

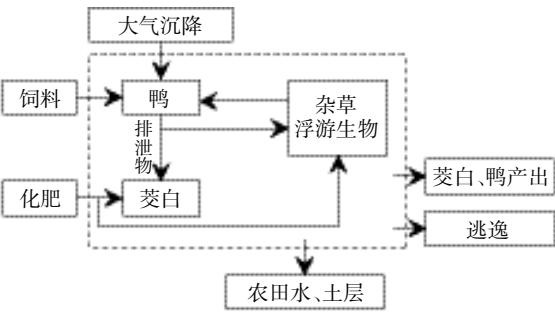
$$\text{氮逃逸}(\text{kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{氮盈余} - \text{氮残留} \quad (8)$$

氮残留表示茭白主要养分吸收土层(0~40 cm)中矿质氮和有机氮残留量,其中矿质氮包括硝态氮和铵态氮。氮逃逸包括通过径流、淋洗、氨挥发、硝化-反硝化等损失的氮量。

茭白-鸭共作系统中有关经济效益的各项参数计算方法如下:

$$\text{经济效益}(\text{元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}) = \text{产品产值} - \text{投入成本} = (\text{茭白产值} + \text{鸭产值}) - (\text{茭白种苗} + \text{化肥} + \text{生物农药} + \text{鸭苗} + \text{育雏费用} + \text{鸭饲料} + \text{围网与鸭舍} + \text{人工管理} + \text{地租}) \quad (9)$$

$$\text{茭白产投比} = \text{茭白产值} / (\text{茭白种苗} + \text{化肥} + \text{生物}$$



虚线内部为茭白-鸭共作生态系统;
大气沉降包括湿沉降(降雨和降雪)和干沉降(尘埃);
逃逸包括径流、淋洗、氨挥发、硝化-反硝化等途径

图 1 茭白-鸭共作系统中氮平衡示意图
Figure 1 Nitrogen balance in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem

农药+人工管理+地租) (10)

鸭产投比=鸭产值/(鸭苗+育雏费用+鸭饲料+围网与鸭舍) (11)

调研当地市场价格情况,各参数如下:茭白种苗自育费用 300 元·667 m⁻², 尿素 2.4 元·kg⁻¹, 复合肥 2.8 元·kg⁻¹, 生物农药 8 元·667 m⁻², 鸭苗 3.5 元·只⁻¹, 育雏费用 0.6 元·只⁻¹, 鸭饲料 3.6 元·kg⁻¹, 围网和鸭舍建设 600 元·667 m⁻², 田间人工管理 585 元·667 m⁻², 地租费 640 元·667 m⁻²。茭白田头批发价 4 元·kg⁻¹, 鸭市价为 23 元·kg⁻¹。

文中各组数据之间的大小关系, 通过 SPSS 19.0 软件进行单因素分析中的最小显著差数法检验 (LSD; Least-Significant Difference) 进行多重比较 ($P<0.05$)。所有数据计算和图形制作分别通过 Excel 10.0 和 SigmaPlot 10.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 茭白-鸭共作系统中茭白与鸭产量

单作茭白和茭白-鸭共作系统的产量见表 2。单作茭白产量为 1 054.87 kg·667 m⁻², 茭白-鸭共作系统中茭白的平均产量为 1 332.41 kg·667 m⁻², 较单作茭白增

表 2 茭白-鸭共作系统中茭白与鸭产量

Table 2 Yield of *Zizania latifolia* and duck in mutual ecosystem

处理	茭白产量/kg·667 m ⁻²	单鸭重/kg·只 ⁻¹	鸭总重/kg·667 m ⁻²
CK	1 054.87b		
D20	1 296.16a	2.17a	43.48c
D25	1 363.79a	2.17a	54.32b
D30	1 337.28a	2.13a	63.89a

注:同一列中不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)。

产 26.31%。当茭白田鸭密度为 25 只·667 m⁻² 时, 茭白产量最高为 1 363.79 kg·667 m⁻², 鸭密度再增加后, 茭白产量出现下降趋势。其原因可能是, 茭白田鸭密度较大, 其活动区域相对减少, 天然饲料也相对减少, 在鸭活动较为集中的区域, 少数茭白植株受到长期踩踏或挤压, 不利于生长。茭白-鸭共作系统中单鸭重平均为 2.16 kg·只⁻¹, D30 处理单鸭重最小为 2.13 kg·只⁻¹。鸭密度较大, 其取食数量和活动区域相对减少可能是单鸭重较小的原因。D20 处理鸭总重最小为 43.48 kg·667 m⁻², D30 处理最大为 63.89 kg·667 m⁻²。

2.2 茭白-鸭共作系统中氮平衡情况

对单作茭白和茭白-鸭共作系统的氮平衡情况分析表明(表 3), 单作茭白氮输入总量为 22.27 kg N·667 m⁻², 茭白-鸭共作系统氮输入总量较高, 平均为 23.72 kg N·667 m⁻²。单作茭白系统中化肥氮投入量为 19.85 kg N·667 m⁻², 占总氮投入的 89.10%, 茭白-鸭共作系统中化肥氮投入量平均减少了 22.61%, 占总氮投入的 65.13%(表 3, 图 2)。茭白-鸭共作系统中增加了饲料氮投入, D20、D25 和 D30 处理饲料氮投入分别为 4.62、5.78 kg N·667 m⁻² 和 6.94 kg N·667 m⁻², 分别占总氮投入量的 19.74%、24.37%和 28.89%。

表 3 茭白-鸭共作系统中氮素输入、输出及盈余情况(kg N·667 m⁻²)

Table 3 N input, N output and N surplus of *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem (kg N·667 m⁻²)

氮平衡	类别	CK	D20	D25	D30
氮输入	大气沉降	2.20	2.20	2.20	2.20
	化肥	19.85a	16.32ab	15.43b	14.55b
	茭白苗	0.22	0.22	0.22	0.22
	饲料	—	4.62b	5.78ab	6.94a
	鸭苗	—	0.07a	0.08a	0.10a
	合计	22.27a	23.43a	23.72a	24.01a
氮输出	茭白	5.00a	6.00a	6.47a	6.33a
	鸭	—	1.11b	1.39a	1.64a
	合计	5.00b	7.11a	7.86a	7.97a
氮盈余		17.27a	16.32a	15.86a	16.04a

注:同一行中不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)。下同。

单作茭白氮输出量为 5.00 kg N·667 m⁻², 占总氮投入的 22.45%, 茭白-鸭共作系统氮输出总量较高, 平均为 7.65 kg N·667 m⁻², 占总氮投入的 32.24%。茭白-鸭共作系统中, 氮输出主要以茭白氮输出为主, 平均占氮输出总量的 82.13%。

可见, 除了收获农牧产品输出氮, 很大一部分氮素盈余没有被产品当季吸收利用。单作茭白氮盈余量

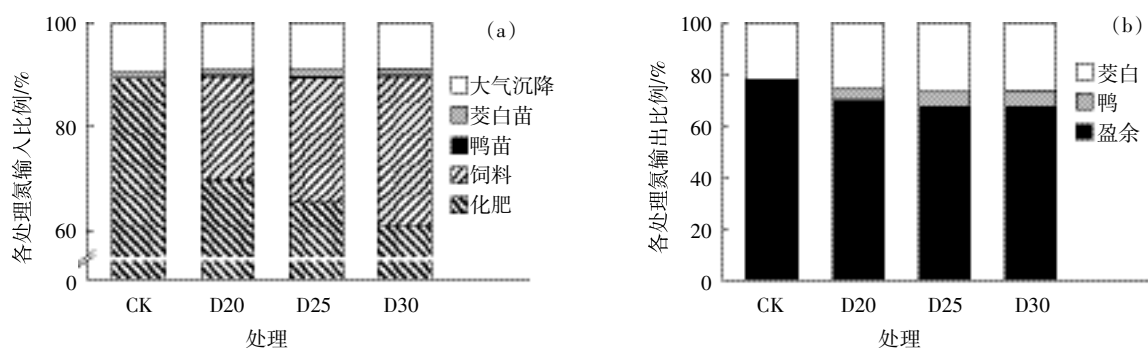


图 2 茭白-鸭共作系统中氮输入(a)与输出(b)比例

Figure 2 N input rate (a) and N output rate (b) in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem

为 $17.27 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 占总 N 投入的 77.55%, 茭白-鸭共作系统氮盈余量平均为 $16.07 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 占总 N 投入的 67.76%。盈余的氮素一部分残留在土壤中, 一部分逃逸到环境中。茭白单作和茭白-鸭共作系统氮残留相似, 分别为 $7.11 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 和 $7.18 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 茭白单作系统氮逃逸量为 $10.16 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 茭白-鸭共作系统氮逃逸量平均为 $8.89 \text{ kg N} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 比茭白单作少 12.5%, 其原因可能是, 茭白-鸭共作系统中部分氮素以有机氮形式存在, 相对矿质氮而言, 不易以淋洗等途径逃逸到环境中。D20、D25 和 D30 处理有机氮残留量逐渐增加(图 3)。

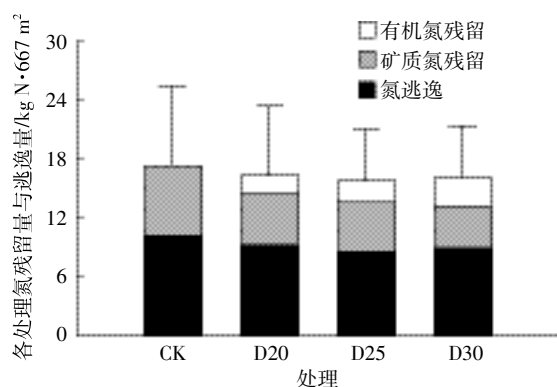


图 3 茭白-鸭共作系统中土壤氮残留及损失

Figure 3 N residue and loss in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem

2.3 茭白-鸭共作系统的经济效益分析

单作茭白和茭白-鸭共作系统中投入成本、产品产值和经济效益如表 4 所示, 单作茭白投入成本为 $1687 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 茭白-鸭共作系统投入成本平均为 $3114 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 其中 D30 处理投入成本最高, 为 $3280 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 约是 CK 处理的 2 倍。单作茭白系统中地租和人工管理费用投入成本较高, 两者合计为 $1225 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 占总投入成本的 72.61%。除了地租和人

工管理投入成本, 茭白-鸭共作系统中鸭饲料、围网与鸭舍建设也是主要的投入成本。茭白-鸭共作系统中地租、人工管理、鸭饲料、围网与鸭舍建设投入成本之和平均为 $2590 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 占总投入成本的 83.17%。D20、D25 和 D30 处理中鸭饲料投入成本逐渐增加, 分别为 612 、 $765 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 和 $918 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 。当季围网与鸭舍可在下季的生产中延续使用, 从而降低投入成本。

单作茭白产值为 $4220 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 茭白-鸭共作系统产品产值平均为 $6568 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 其中 D30 处理产品产值最高为 $6817 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 比 CK 处理高 61.55%。茭白-鸭共作系统中, 茭白产值为主, 平均为 $5329 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 占总产品产值的 81.14%。单作茭白经济效益为 $2533 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 茭白-鸭共作系统经济

表 4 茭白-鸭共作系统中投入成本、产品产值及经济效益情况(元·667 m⁻²)Table 4 Input cost, economic income and benefit in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem (yuan·667 m⁻²)

项目	类别	CK	D20	D25	D30
投入成本	茭白种苗	300	300	300	300
	化肥	154a	122ab	114b	106b
	生物农药	8	8	8	8
	鸭苗		70b	87.5ab	105a
	育雏费用		12b	15ab	18a
	鸭饲料		612b	765ab	918a
	围网与鸭舍		600	600	600
	人工管理	585	585	585	585
产品产值	地租	640	640	640	640
	合计	1687b	2949a	3114a	3280a
	茭白产值	4220b	5184a	5456a	5348a
	成鸭产值		1000b	1248ab	1469a
经济效益	合计	4220b	6184a	6704a	6817a
		2533b	3235a	3589a	3538a

效益平均为 3 454 元·667 m⁻², 其中 D25 处理经济效益最高为 3 589 元·667 m⁻², 比 CK 处理高 41.69%。

单作茭白产投比为 2.5:1, 茭白田养鸭密度为 25 只·667 m⁻² 时, 茭白产投比最高为 3.3:1, 当鸭密度再增加, 茭白产投比不再增加(图 4a), 其主要原因可能是鸭密度达到 25 只·667 m⁻² 时茭白产量不再增加(表 2)。茭白-鸭共作系统中鸭的产投比都小于 1, 随着放养鸭密度的增加, 鸭产投比逐渐增加, 从 D20 处理的 0.77 增加到 D30 处理的 0.90(图 4b), 其主要原因可能是, 围网和鸭舍投入成本仅用于一季茭白-鸭共作生产时利用效率较低, 而实际可以重复利用 2~3 次。

3 讨论

3.1 茭白田放养鸭 25 只·667 m⁻² 有利于增产增收和保护生态环境

分析了单作茭白和茭白-鸭共作系统中氮素平衡与经济效益情况。结果表明: 茭白-鸭共作系统中茭白平均产量为 1 332.41 kg·667 m⁻², 茭白田放养鸭 25 只·667 m⁻² 时产量最高为 1 363.79 kg·667 m⁻², 比单作茭白增产 29.29%。单作茭白氮盈余为 17.27 kg N·667 m⁻², 茭白-鸭共作系统氮盈余平均减少 6.95%。茭白-鸭共作系统经济效益平均为 3 454 元·667 m⁻², D25 处理经济效益最高为 3 589 元·667 m⁻², 比单作茭白处理高 41.69%。综合考虑氮平衡和经济效益, 本试验条件下, 茭白田放养鸭 25 只·667 m⁻² 的共作系统的经济效益较高, 并且氮素盈余较少, 可降低对环境的污染风险。

3.2 茭白-鸭共作系统中适宜施氮量与最佳产投比的相关性尚需进一步研究

江苏里下河地区水资源丰富, 水生蔬菜种植和水

禽养殖业异常发达, 已形成了地方特色产业。然而, 在农业现代化的进程中, 随着农药、化肥的广泛应用, 农产品质量下降、有机肥资源浪费和环境污染等问题日益严重, 人们对发展生态农业的要求日益强烈^[21-22]。近年来, 茭白与鸭共作模式得以逐步发展, 相关研究主要集中在产量与经济效益等方面^[2-5], 而有关该系统环境保护与优化生态种养密度方面的研究极少。本文设置不同密度鸭与茭白共作, 分析该共作系统中氮素平衡与经济效益情况, 为进一步优化该生产模式提供了相应理论和实践依据。

本研究表明, 单作茭白氮素盈余为 17.27 kg N·667 m⁻², 占到化肥氮投入量的 87.00%。过量的氮素残留在土壤中(图 3), 或者通过淋洗渗透到地下水, 通过氨挥发和硝化反硝化逃逸到大气中^[23]。这些逃逸的氮素, 主要以活性氮形式存在环境中, 是导致温室气体排放增加、地下水污染、水体富营养化和土壤酸化的原因之一^[7-13]。茭白与鸭共作可以促进氮素的利用, 减少氮素盈余。D25 处理氮素利用量占总氮投入量的 33.12%, 比单作茭白高 10.67%, 氮素盈余为 15.86 kg N·667 m⁻², 比单作茭白少 8.15%(表 3)。其原因可能是, 鸭对茭白生长期间的虫害和杂草发生进行有效控制, 以及鸭粪对土壤的培肥和持续释放养分的作用, 从而改善茭白生长环境, 促进了氮素吸收利用。然而, 由于本研究参照农民施肥习惯设计茭白-鸭共作系统的施氮处理, 氮素盈余依然较大, 因此, 在共作系统的基础上, 如何确定适宜施氮量, 将是进一步减少氮素盈余, 优化该共作系统的关键。以“根层养分调控”为核心的协调作物高产和资源高效的氮素实时监控技术可用于将来茭白-鸭共作系统中确定适宜施氮量的相关研究中^[23-24]。

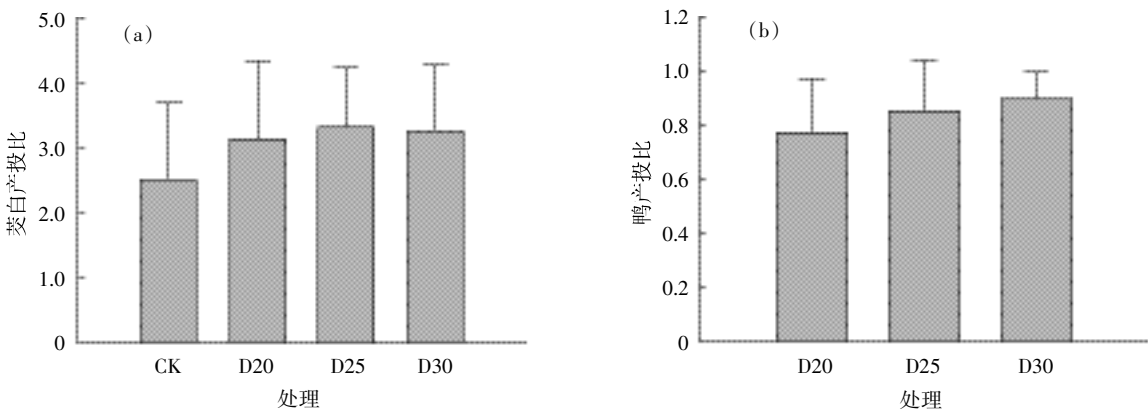


图 4 茭白-鸭共作系统茭白(a)与鸭(b)产投比

Figure 4 Input-output ratios of *Zizania latifolia* (a) and duck (b) in mutual ecosystem

茭白-鸭共作系统不仅使茭白增产,而且由于利用了立体空间多收了鸭,D25 处理经济效益最高,为 3 589 元·667 m²,比单作茭白高 41.71%(表 4)。然而,单从养鸭的经济效益来看,鸭产投比小于 1,为 0.84:1,其主要原因可能是,围网和鸭舍投入成本仅用于一季茭白-鸭共作生产时利用效率较低。在实际生产中,围网和鸭舍可以重复利用 2~3 次。当围网和鸭舍在下一季共作生产中或者当季茭白放养两期鸭时重复使用,鸭产投比可提高至 1.1:1。另外,适当扩大茭白-鸭共作系统的种养规模,可以提高鸭的产投比。根据相应的材料和人工费用估算,以 25 只·667 m² 密度放养鸭,当茭白田面积达到 3.2×667 m² 时,围网和鸭舍建设费用为 1 250 元,鸭产投比为 1:1。可见,在茭白-鸭共作模式的推广应用中,应注重投入资源的重复利用,特别是将来土地流转,由一家一户的分散经营向专业大户、家庭农场、农民合作社等多种形式的规模经营方式转变更为有利。

本研究茭白-鸭共作处理的施肥设计中,采用了前人的相关参数用于估算鸭粪氮含量,这些参数与本试验实际测定结果基本相似。比如:成鸭单重前参数和实测值分别为 2.22 kg·只⁻¹ 和 2.16 kg·只⁻¹,成鸭氮含量分别为 2.5%和 2.6%,料肉比分别为 3.85 和 3.94。另外,本研究仅分析了茭白-鸭共作系统的氮平衡情况,而没有区分“土壤子系统”和“鸭子系统”的相关内容。详细分析各子系统氮的输入、输出及循环情况,旨在完善茭白田氮肥管理及协调食物链各环节,为物质产投结构的合理构建、茭白-鸭共作模式的推广应用提供参考依据。

4 结论

分析了单作茭白和茭白-鸭共作系统中氮素输入、输出与盈余(盈余=输入-输出),以及经济效益情况。结果表明,本试验条件下,当茭白田放养鸭密度为 25 只·667 m² 时,茭白-鸭共作系统中氮素盈余较少为 15.86 kg N·667 m²,经济效益较高为 3 589 元·667 m²。盈余的氮素一部分残留在土壤中,一部分逃逸到环境中。茭白单作系统氮逃逸量为 10.16 kg N·667 m²,茭白-鸭共作系统氮逃逸量较少平均为 8.89 kg N·667 m²。为了进一步减少茭白-鸭共作系统中氮素盈余和氮逃逸量,实现该系统作物高产与低环境风险协同发展,必须对如何优化该系统中施肥技术进行更多的研究。

参考文献:

- [1] 张帆,陈源泉,隋鹏,等. “双季稻-鸭”共生生态系统稻作季节氮循环[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 178-184.
ZHANG Fan, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. Nitrogen cycling in rice-duck mutual ecosystem during double cropping rice growth season [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 178-184. (in Chinese)
- [2] 陈建明,张珏锋,周杨,等. 我国茭白高效种养和轮作套种模式的研究与实践[J]. 长江蔬菜, 2013, 18: 127-130.
CHEN Jian-ming, ZHANG Jue-feng, ZHOU Yang, et al. Efficient planting-raising, rotation and interplanting models of *Zizania latifolia* and their application in China[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013, 18: 127-130. (in Chinese)
- [3] 蔡桂荣,孙爱武. 茭鸭共作高产高效的原因及配套技术[J]. 上海蔬菜, 2007(6): 68-69.
CAI Gui-rong, SUN Ai-wu. The reason and matching technology for high yield and efficiency in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem[J]. *Shanghai Vegetables*, 2007(6): 68-69. (in Chinese)
- [4] 夏胜平,姚良洪. 茭白田综合种养技术[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(23): 227.
XIA Sheng-ping, YAO Liang-hong. Integrated farming technique for *Zizania latifolia*[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(23): 227. (in Chinese)
- [5] 邓曹仁,郑春龙,祝财兴,等. 茭白田养鱼和养鸭生产技术模式的探讨[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(3): 205-208.
DENG Cao-ren, ZHENG Chun-long, ZHU Cai-xing, et al. Exploring two cultivation models of Jiaobai-fish and Jiaobai-duck in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2003, 15(3): 205-208. (in Chinese)
- [6] 刘学军,赵紫娟,巨晓棠,等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128.
LIU Xue-jun, ZHAO Zi-juan, JU Xiao-tang, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1122-1128. (in Chinese)
- [7] Zhu Z, Chen D. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117-127.
- [8] Zhang W, Tian Z, Zhang N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1996, 59: 223-231.
- [9] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009(2): 659-662.
- [10] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106: 3041-3046.
- [11] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chi-

- nese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1018.
- [12] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 410–416.
- [13] 夏生林, 熊国远. 稻鸭共生中鸭的放养密度及作用效果研究[J]. 农技服务, 2012, 29(12): 1314–1315.
XIA Sheng-lin, XIONG Guo-yuan. Effects of duck stocking density in rice-duck integrated farming technology[J]. *Agricultural Technology Service*, 2012, 29(12): 1314–1315.(in Chinese)
- [14] 杨建春, 陆建飞, 张家宏, 等. 江苏里下河地区鸭鱼共养模式研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(32): 12602–12603.
YANG Jian-chun, LU Jian-fei, ZHANG Jia-hong, et al. Study on the mixed cultivation model of duck and fish in Lixiahe region of Jiang-su Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2013, 41(32): 12602–12603.(in Chinese)
- [15] 贺建华, 杨 风, 陈可容. 鸭肉的营养需要[J]. 四川农业大学学报, 1991, 9(3): 469–476.
HE Jian-hua, YANG Feng, CHEN Ke-rong. The nutrient requirements of meat-type duck[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 1991, 9(3): 469–476.(in Chinese)
- [16] 卢跃红, 戴志明, 张 曦, 等. 稻鸭共生对鸭肉品质和屠宰性能的影响[J]. 中国家畜, 2009, 31(5): 20–22.
LU Yue-hong, DAI Zhi-ming, ZHANG Xi, et al. Effect of rice-duck mutualism on meat quality and slaughter performance of duck[J]. *China Poultry*, 2009, 31(5): 20–22.(in Chinese)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.(in Chinese)
- [18] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 等. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 972–979.
CHANG Yun-hua, LIU Xue-jun, LI Kai-hui, et al. Research progress in atmospheric nitrogen deposition[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6): 972–979.(in Chinese)
- [19] Luo X S, Liu P, Tang A H, et al. An evaluation of atmospheric N_r pollution and deposition in North China after the Beijing Olympics[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74: 209–216.
- [20] 杜 伟, 蒯超普, 姜小三, 等. 长三角地区典型稻作农业小流域氮素平衡及其污染潜势[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 9–14.
DU Wei, TI Chao-pu, JIANG Xiao-san, et al. Balance and pollution potential of nitrogen in a typical rice-based agricultural watershed of Yangtze River delta region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1): 9–14.(in Chinese)
- [21] 陈建明, 丁新天, 张珏锋, 等. 芸薹素内酯和复硝酚钠对茭白生长发育和产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2013, 18: 53–55.
CHEN Jian-ming, DING Xin-tian, ZHANG Jue-feng, et al. Effects of brassinolide, compound sodium nitrophenolate on growth, development and yield of *Zizania latifolia*[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2013, 18: 53–55.(in Chinese)
- [22] 孙 刚, 房 岩, 韩国军, 等. 稻-鱼复合生态系统对水田土壤理化性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 21–24, 47.
SUN Gang, FANG Yan, HAN Guo-jun, et al. Effects of rice-fish integrated ecosystem on physical and chemical properties of paddy soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(4): 21–24, 47.(in Chinese)
- [23] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 55–91.
CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. Theory and practice of nutrient resource management in wheat-maize rotation cropping system[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 55–91.(in Chinese)
- [24] 张福锁. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 1–9.
ZHANG Fu-suo. Formula fertilization technology by soil testing[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 1–9.(in Chinese)