中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国60年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第31卷 第4期
Vol.31 No.4
2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 4 期　　2011 年 2 月　(半月刊)

目　　次

专论与综述

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 32 * 2011-02

生 态 学 报 2011,31(4):1093—1100
Acta Ecologica Sinica

“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环

张 帆[1,2],隋 鹏[1],陈源泉[1],高旺盛[1,*]
(1. 中国农业大学循环农业研究中心,北京 100193;2. 湖南省土壤肥料研究所,长沙 410125)

摘要:稻鸭共生是对我国传统农业稻田养鸭的继承与发展。在长江流域双季稻主产区湖南布置了稻田养鸭田间试验,以常规稻作为对照,研究“稻鸭共生”生态系统 N、P 循环。结果表明:“稻鸭共生”生态系统 N、P 输出分别为 153.50 kg/hm^2 和 59.03 kg/hm^2,其中鸭产品 N、P 输出分别是 23.98 kg/hm^2 和 3.10 kg/hm^2;“稻鸭共生”系统在目前的 N、P 养分投入水平下,土壤存在严重的 N 和 P 亏缺;鸭子系统 N、P 输入对系统外饲料投入依赖高,自持能力较差;鸭粪 N、P 参与当季的稻田养分循环,其循环率分别为 10.66% 和 28.16%。

关键词:“稻鸭共生”生态系统;鸭子系统;土壤子系统;N 循环;P 循环

Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season

ZHANG Fan[1,2], SUI Peng[1], CHEN Yuanquan[1], GAO Wangsheng[1,*]
1 *Circular Agriculture Research Center, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*
2 *Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha* 410125, *China*

Abstract: The pattern of raising duck in paddy field is a model in Chinese traditional agriculture. Which is a combination system of planting and breeding in rice paddy field in subtropical region. This model can increase the efficiency of using rice paddy field. Field experiments on N and P cycling from a rice- duck mutual ecosystems in double cropping rice region in Hunan Province were conducted from July to October in 2009, and a conventional rice field was used as control. This study applied Input-Output Analysis method to analyze N and P cycling in both rice-duck and conventional rice fields. The main objectives of this study were to provide theoretical and practical basis for further development and utilization of this classical agricultural technique. Neither chemical pesticides nor herbicides were applied throughout the growth period of rice in rice-duck mutual ecosystems, N fertilizer appliation was also reduced, and the surface water was maintained about 10 cm in depth during the period of raising ducks. Ducks of 50-day-old were introduced into the paddy field based on the holding capacity of 450 ducks per ha 17 days after seedling transplantation. These ducks were retrieved after the complete heading stage of rice in the experiments. The results showed that N and P outputs in conventional rice field were 127.76 and 62.02 kg/hm^2 respectively while the N and P outputs in the rice-duck mutual ecosystems were 153.50 and 59.03 kg/hm^2, respectively. Raising ducks resulted in the increase of N outputs compared to the conventional rice field. Furthermore, N and P outputs from ducks were 23.98 and 3.10 kg/hm^2, respectively. Soil N and P occurred deficit in rice-duck mutual ecosystems. The N and P inputs from feeds were very high in the duck sub-system. In rice-duck mutual ecosystems, N and P input from chemical fertilizer were 72 kg/hm^2 and 13.10 kg/hm^2, respectively; N and P input from feed were 64.44 kg/hm^2 and 36 kg/hm^2, respectively; N and P input from duckling were 0.81 kg/hm^2 and 0.14kg/hm^2, respectively. During Late Rice growth season, duck growth increased feces N 14.27 kg/hm^2, feces P 16.10 kg/hm^2, and feces organic carbon was 157.54 kg/hm^2. Duck feces N and P cycling rate were 10.66% and 28.16% kg/hm^2, respectively.

基金项目:国家科技支撑计划农田复合生物共生循环模式与技术研究(2007BAD89B01)
收稿日期:2010-01-06; **修订日期**:2010-06-25
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wshgao@ cau. edu. cn

Key Words: late rice; rice-duck mutual ecosystem; duck sub-system; soil sub-system; N cycling; P cycling

"稻鸭共生"生态系统是充分利用共生互利、生态位和食物链等生态学原理,以稻作水田为条件,以种稻为中心,家鸭田间网养的自然与人工相配合的稻田种养生态系统,是对我国传统农业稻田养鸭的继承与发展。该系统以鸭子捕食害虫代替农药、以鸭子踩食杂草代替除草剂、以鸭子粪便作为有机肥料代替化肥、以鸭子不间断的活动产生中耕混水效果来刺激水稻生长,实现以田养鸭,以鸭促稻,以鸭护稻,使鸭和水稻共栖生长。"稻鸭共生"是我国循环农业发展的重要模式[1],目前的研究主要集中在稻鸭共生对温室气体的影响效果及机理[2-5]、病虫草害的控制效果及机理[6-7]、水体生态系统[8-11]、水稻生长[12-13]、土壤性质[14-18]、效益核算[19-20]等方面。李成芳等[21]对稻鸭共作生态系统的N素平衡进行了研究,但关于稻鸭共生生态系统N、P循环研究极少。

N和P是物质的基本组成元素,其循环路径和效率对提高生态系统生产力起着重要的作用,探明N、P循环规律,有助于提高农业生态系统的养分利用率。本文主要是研究N、P在"稻鸭共生"生态系统中流动和转化,分析系统N、P的输入输出情况,旨在为完善稻田的N、P肥管理、科学组装和协调食物链各环节使物质产投结构更合理、促进稻鸭技术的推广应用提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和自然条件

本研究于2009年7月在湖南省浏阳市北圣镇乌龙村一肥力均匀的稻田自然丘块上进行,该地区具有亚热带季风湿润气候,年平均气温16—18℃,≥10℃的活动积温5000—5800℃,无霜期260—310d,年降雨量1200—1700mm,种植制度为"冬闲—早稻—晚稻"。土壤类型为第四纪红色粘土发育的红黄泥水稻土,土壤有机质36g/kg,全氮2.32 g/kg,全磷1.14 g/kg,全钾11.6 g/kg,有效氮255 mg/kg,有效磷81.7 mg/kg,有效钾144 mg/kg。

1.2 试验材料

晚稻品种为黄花占,鸭品种为"江南一号"水鸭。鸭饲料为国雄8549肉仔鸭中后期配合饲料,主要原料组成为:玉米、豆粕、棉粕、菜粕、豆油、洗米糠、大米蛋白粉、食盐、碳酸钙、磷酸氢钙、酶制剂、赖氨酸、蛋氨酸等。

1.3 试验设计与栽培管理

1.3.1 试验田地设置

2009年7月16日收获前茬作物早稻(早稻收割时留10cm的残茬)后,稻田立刻进水泡田,泡田3d后,进行机械旋地。然后将此自然丘田分成6个面积均等的小区,小区面积为15m×6m。各小区四周均用长为6m或15m,厚为30mm,高为35cm的硬质朔料薄板隔开,朔料薄板地下深埋20cm,田面上留15cm,以防止0—20cm耕层土壤及各小区间肥水窜流。各小区均留有一可控制的进水口,田面水深可根据朔料薄板上的刻度来控制。自然丘田四周用泥巴砌成田埂,埂高30cm,并设有一个进水口和出水口。

1.3.2 试验设计

试验设2个处理,随机区组设计,重复3次。

处理Ⅰ(常规稻作) 在水稻的整个生育期间根据田间病虫害情况打农药(晚稻一般为4次),打水田除草剂,晚稻在移栽7d后追N肥(尿素,含氮量为45%),施用量为75 kg/hm^2。

处理Ⅱ(稻鸭共生) 在水稻的整个生育期间不打农药和除草剂,水稻移栽后不追肥。水稻移栽15d后放鸭,试验每小区放4只鸭(放鸭数量以450只/hm^{2}为标准),水稻齐穗期收鸭,鸭放养期间根据田间饵料情况酌情补饲料。

1.3.3 田间管理

本季试验晚稻移栽时间是7月22日,收获时间是10月20日。晚稻插植密度为24cm×15cm,晚稻移栽前各处理小区均施入基肥,基肥为复合肥(N-P_2O_5-K_2O:12-5-8),施用量为600 kg/hm^2。稻鸭共生小区四周

用高 80cm 的尼纶丝网做成围栏,以防鸭子外逃;并在小区角落放置一鸭棚,以便鸭子休憩和喂食,同时防止鸭饲料进入稻田土壤和水体。8 月 7 日,稻鸭共生每小区均放入鸭龄为 50d,体重为 400g 的鸭子。稻田灌溉水来自附近的自然水塘。各处理田面水均维持在 10cm,当田面水降至 5cm 时稻田灌水。水稻齐穗期(9 月 29 日)以后稻田不再灌溉。

1.4　样品的采集与测定方法

1.4.1　在 7 月 16 日和 10 月 20 日, 依据 S 形 5 点采样法用内径 20mm 的土钻,采集 0 －20cm 的耕层土壤,混匀。土壤样品全 N、全 P、全 K、速效 N、速效 P、速效 K、有机质和 pH 的测定方法参见《土壤农业化学分析方法》[22]。

1.4.2　在水稻收获期 10 月 20 日,每重复小区随机取 3 个 1m × 1m 样方测定其水稻植株植株地上部分(分水稻籽粒和秸秆)和地下部分生物量,植株样全氮采用硫酸-双氧水消煮-扩散法测定[22],植株样全磷采用硫酸-双氧水消煮-钼锑抗比色法测定[22]。

1.4.3　每天详细记录喂鸭的饲料重量,计算其投入饲料总量,并化验分析鸭饲料全 N、全 P 养分含量,测定方法同植株样分析。

1.4.4　稻鸭共生期,每隔 7d 对每小区的鸭进行随机采样,测定每只鸭的日排泄量,计算总排泄量;鸭粪全 N 采用硫酸-过氧化氢消煮-凯氏蒸馏法测定[22];鸭粪全 P 采用硫酸-过氧化氢消煮-钒钼黄比色法测定[22];鸭粪全碳采用重铬酸钾容量法测定[22]。

1.4.5　稻田杂草一般在秧苗移栽后的 5d 萌发,禾苗封行时达到生长高峰,稻鸭共生时,杂草即生即食,根本无法生长。放鸭前一天即 8 月 6 日,稻鸭共生小区随机取 3 个 1m × 1m 样方测定田间杂草生物量,杂草样品全 N、全 P 含量测定方法同植株样分析。

1.4.6　在稻田虫害发生的每个时期,以 S 形 5 点法,用纱巾网袋收集稻鸭共生小区水稻植株上的稻飞虱等害虫(每点收集 5 株水稻的害虫,剔除蜘蛛)。害虫样于 105℃烘 24h 后,称重并粉碎过 100 目筛。害虫样全 N、全 P 含量测定方法同植株样分析。

1.4.7　记载水稻整个生育期间灌水次数。从稻田进水口处定期取灌溉水样,灌溉水全 N 含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定[22];灌溉水全 P 含量采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定[22]。

1.4.8　在水稻齐穗期收鸭子,并称重;并随机取每小区的 1 只鸭放血屠宰,血毛收集,内脏除去内容物,称得血、毛、头、鸭掌、内脏、鸭肉、皮、骨、油各部分重量,按部位和重量比例每只鸭采样 100g,样品于 105℃烘 24h 后粉碎过 100 目筛。鸭样品全 N、全 P 含量测定方法同植株样分析。

试验结果均以每次测得的 3 次重复分析的平均值来表示,试验数据采用 $DPS_V 7.05$ 软件统计分析。

2　结果与讨论

2.1　土壤子系统 N 循环

土壤子系统 N 素输入、输出及平衡状况见表 1。土壤子系统总 N 输入量常规稻作高于“稻鸭共生”。“稻鸭共生”系统因有有机肥鸭粪还田,所以化学 N 输入减少,仅为 72 kg/hm^2。本研究得出稻鸭共生期,每只鸭平均日排鲜粪为 0.12kg,稻鸭共生 54d,可对稻田增加氮 14.27 kg/hm^2,增加有机碳 157.54 kg/hm^2。在稻鸭共生期间稻田长期保持有 10 cm 的水层,水是水稻丰产、稳产的先决条件,同时也是鸭子开展各项田间活动、发挥役用功能的主要场所。灌溉水总 N 平均浓度为 3.06mg/L,“稻鸭共生” 和常规稻作灌溉水的体积分别是 9500m^3/hm^2 和 8500 m^3/hm^2,因此灌溉水 N 输入分别为 29.07 kg/hm^{2}和 26.01 kg/hm^2。

土壤子系统总 N 的输出量常规稻作低于“稻鸭共生”。本研究中土壤子系统的氮输出主要指水稻植株吸收的氮量。“稻鸭共生”水稻 N 吸收量是 133.86 kg/hm^2,比常规稻作高 1.96% ($P > 0.05$),这说明减少化学氮肥施用量,稻田养鸭能促进水稻对 N 的吸收,原因可能是:因为鸭子的存在,抑制了稻田水生生物水藻的生长[10-11],减少其对土壤和水体 N 的吸收;鸭子的田间活动和刺激作用,提高了水稻根系活力,减缓水稻生育后期根系活跃吸收面积的下降速度,从而促进水稻对 N 的吸收[13];稻鸭共生改善水体理化性质,提高了有效肥

力的供应[8]。氨挥发是稻田氮肥损失的主要途径之一。因“稻鸭共生”系统化学氮肥施用量减少、有机肥鸭粪还田、鸭子不间断的活动等对氨挥发有抑制作用[21,23-24],并且稻田养鸭能降低N素的下渗淋失[9,21],所以土壤子系统氮损失的减少也是“稻鸭共生”系统水稻吸N量增加的可能原因之一。

土壤子系统N素的盈亏状况直接关系到土壤肥力的高低及系统的养分平衡。稻鸭共生在目前的N投入水平下,存在严重的N亏缺现象。

表1 土壤子系统N循环

Table 1 N cycle of soil sub-system in single rice planting, rice-duck mutual ecosystem

系统 System	输入 Input/(kg/hm²)				输出 Output/(kg/hm²)				平衡 Balance
	化肥 Chemical fertilizer	灌溉水 Irrigation	鸭粪 Duck feces	合计 Total	水稻植株地下部分 Rice root	秸秆 Rice straws	籽粒 Rice seed	水稻吸收 Uptake of rice	
常规稻作 Conventional rice	105.75	26.01	—	131.76	3.52	43.54	84.22	131.28	0.48
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	72.00	29.07	14.27	115.34	4.34	50.36	79.16	133.86	-18.52

2.2 土壤子系统P循环

土壤子系统P素输入、输出及平衡状况见表2。“稻鸭共生”和常规稻作土壤子系统P输出均大于P输入。灌溉水总P平均浓度为0.38mg/L,“稻鸭共生”和常规稻作灌溉水P输入分别为3.61 kg/hm^{2}和3.23 kg/hm^2。“稻鸭共生”系统鸭粪可对稻田增加磷16.10 kg/hm^2,因此“稻鸭共生”土壤子系统P输入高于常规稻作。“稻鸭共生” 土壤子系统P输出低于常规稻作。有研究表明[14,25],稻田养鸭显著提高水稻植株对P的吸收。本研究水稻P吸收量是57.17 kg/hm^2,比常规稻作低10.93% ($P>0.05$)。

土壤子系统P素的盈亏状况直接关系到土壤肥力的高低及系统的养分平衡。常规稻作和稻鸭共生在目前的P投入水平下,均存在严重的P亏缺现象。

表2 土壤子系统P循环

Table 2 P cycle of soil sub-system in single rice planting, rice-duck mutual ecosystem

系统 System	输入 Input/(kg/hm²)				输出 Output/(kg/hm²)				平衡 Balance
	化肥 Chemical fertilizer	灌溉水 Irrigation	鸭粪 Duck feces	合计 Total	水稻植株地下部分 Rice root	秸秆 Rice straws	籽粒 Rice seed	水稻吸收 Uptake of rice	
常规稻作 Conventional rice	13.10	3.23	—	16.33	1.40	17.64	44.18	63.22	-46.89
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	13.10	3.61	16.10	32.81	1.25	17.53	38.39	57.17	-24.36

2.3 鸭子系统N、P循环

稻鸭共生由于鸭子的引入形成了一个种养复合的生态系统,鸭子系统的加入使整个系统具有次级生产,鸭子的日常活动与排泄等行为使系统更加复杂化,系统N、P投入产出发生改变。稻鸭共生系统中以鸭子捕食害虫代替农药、以鸭子踩食杂草代替除草剂,因此鸭子所食的杂草和害虫的N、P含量也是鸭子系统物质循环的有效部分。由表3可见,鸭子系统N、P输入均大于N、P输出。鸭子系统输入的N、P中,饲料带入的N、P比例最大,分别占98.6%和99.6%。成鸭P输出仅为3.10 kg/hm^2,占总输出的16.15%,说明鸭产品本身所固定的P量并不大,输出的P大部分以鸭粪排泄物的形式归还给稻田土壤。成鸭N输出为23.98 kg/hm^2,占总输出的62.69%。成鸭N输出远高于P输出,原因可能是:本研究所采用的鸭饲料中添加了植酸酶,提高了鸭对氮的利用率,降低了氮的排泄[26-27]。

2.4 “稻鸭共生”生态系统N循环

由表4可见,在整个晚稻季常规稻作和稻鸭共生系统的N输入、N输出及N归还量各不相同。常规稻作N输入主要是化学肥料和灌溉水带入,化学N占80.26%。常规稻作系统中只有初级生产,所以N输出主要是收获的水稻籽粒和水稻秸秆,其中水稻籽粒N占65.92%。归还给系统的N主要是水稻植株地下部分N。

稻鸭共生系统因有次级生产鸭的引入,进而有鸭粪归还给土壤,所以系统外输入的化学肥料 N 减少,化学 N 占 43.29%,而饲料 N 占 38.74%。稻鸭共生系统中 N 输出为 153.50 kg/hm^2,其中水稻籽粒 N 占 51.57%,而鸭产品 N 仅占 15.62%。归还给系统的 N 是水稻植株地下部分和鸭粪,鸭粪 N 占归还量的 76.68%,而且在晚稻季鸭粪参与了系统内的 N 循环。

表 3　鸭子系统 N、P 循环

Table 3　N,P cycle of duck sub-system in rice-duck mutual ecosystem

	输入 Input/(kg/hm^2)				输出 Output/(kg/hm^2)			输出/输入 Output/Input
	雏鸭带入 Duckling	饲料 Feed	杂草、虫 Weed、insect	合计 Total	鸭粪 Feces	成鸭 Duck	合计 Total	
N	0.81	64.44	0.04	65.29	14.27	23.98	38.25	0.59
P	0.14	36	0.01	36.15	16.10	3.10	19.2	0.53

表 4　“稻鸭共生”生态系统 N 循环

Table 4　N cycle of rice-duck mutual ecosystem

系统 System	输入 Input/(kg/hm^2)					输出 Output/(kg/hm^2)			
	化肥 Chemical fertilizer	鸭饲料 Feed	雏鸭 Duckling	灌溉水 Irrigation	合计 Total	水稻籽粒 Seed	水稻秸秆 Straws	鸭 Duck	合计 Total
常规稻作 Conventional rice	105.75	–	–	26.01	131.76	84.22	43.54	–	127.76
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	72.00	64.44	0.81	29.07	166.32	79.16	50.36	23.98	153.50

系统 System	归还量 Return/(kg/hm^2)			归还量/输入 Return/Input	当季循环养分 Cycling nutrient/(kg/hm^2)	循环率 Cycling rate	输出/输入 Output/Input
	水稻植株地下部分 Rice root	鸭粪 Duck feces	合计 Total				
常规稻作 Conventional rice	3.52	–	3.52	0.03	–	–	0.97
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	4.34	14.27	18.61	0.11	14.27	10.66	0.93

循环率 = 鸭粪归还量/水稻的吸收量 × 100%

常规稻作和稻鸭共生系统外 N 输入均大于系统内 N 输出。稻鸭共生系统因有次级生产,N 的输入、输出均高于常规稻作,同时因有鸭粪还田 N 归还量也高于常规稻作。稻鸭共生 N 输出/输入比低于常规稻作,这是因为系统中加入次级生产后,养分输入量大幅上升,而鸭粪又保留在系统内循环的结果。鸭粪 N 作为循环养分被当季利用,但循环率仅为 10.66%。

2.5　“稻鸭共生”生态系统 P 循环

由表 5 可见,在整个晚稻季常规稻作和稻鸭共生系统的 P 输入、P 输出及 P 归还量各不相同。常规稻作和稻鸭共生系统内 P 输出均大于系统外 P 输入。稻鸭共生 P 输出/输入比低于常规稻作。

表 5　“稻鸭共生”生态系统 P 循环

Table 5　P cycle of rice-duck mutual ecosystem

系统 System	输入 Input/(kg/hm^2)					输出 Output/(kg/hm^2)			
	化肥 Chemical fertilizer	鸭饲料 Feed	雏鸭 Duckling	灌溉水 Irrigation	合计 Total	水稻籽粒 Seed	水稻秸秆 Straws	鸭 Duck	合计 Total
常规稻作 Conventional rice	13.10	–	–	3.23	16.33	44.38	17.64	–	62.02
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	13.10	36	0.14	3.61	52.85	38.39	17.53	3.10	59.03

系统 System	归还量 Return/(kg/hm^2)			归还量/输入 Return/Input	当季循环养分 Cycling nutrient/(kg/hm^2)	循环率 Cycling rate	输出/输入 Output/Input
	水稻植株地下部分 Rice root	鸭粪 Duck feces	合计 Total				
常规稻作 Conventional rice	1.40	–	1.40	0.09	–	–	3.80
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	1.25	16.10	17.35	0.33	16.10	28.16	1.12

稻鸭共生系统 P 输入高于常规稻作，P 输入中饲料 P 占 68.12%，化肥 P 占 24.79%。稻鸭共生系统 P 输出为 59.03 kg/hm²，其中水稻籽粒 P 占 65.03%，鸭产品 P 仅占 5.25%，P 输出仍以水稻籽粒和水稻秸秆为主。稻鸭共生系统因有鸭粪归还给稻田，P 归还量比常规稻作高。鸭粪 P 作为循环养分被当季利用，其循环率为 28.16%。

2.6 系统的稳定性分析

系统的稳定性即系统内产出物质的归还量占总投入量的比例[28]。鸭子系统的稳定性反映了稻田对鸭子系统的影响力及鸭子系统对外界环境的依赖性，稳定度表示为系统内饲料投入占饲料总投入的百分比。系统内饲料指稻田提供的饲料量，饲料总投入指稻田和环境中饲料投入总量。土壤子系统的稳定度就是稻田归还量占稻田总投入百分比，它体现了稻田的自我维持力。稻田归还指归还稻田的根茬、不同形式的秸秆还田及饲料通过鸭转化后的粪还田。稻田总投入除上述归还外，还包括化肥、灌溉水等。

表 6 各子系统的稳定度/%

Table 6 Stabilities of N and P in subsystems

系统 System	土壤子系统 Soil sub-system		鸭子系统 Duck sub-system	
	N	P	N	P
常规稻作 Conventional rice	2.60	7.90	–	–
稻鸭共生 Rice-duck mutualism	15.55	50.94	0.06	0.03

从表 6 可以看出，鸭子系统的 N 和 P 稳定度都非常低，分别为 0.06% 和 0.03%，说明鸭子系统的 N 和 P 大部分依靠饲料投入，对外界依赖高，自持能力较差，潜伏一定不稳定性和生态脆弱性。稻鸭共生土壤子系统 N 和 P 稳定度虽不高但均高于常规稻作，说明稻田养鸭能提高稻田自我维持力，促进资源合理利用。

3 结论

(1) 布置试验的地区即北圣镇乌龙村属于双季稻产区，当地的农民最近几年都是普遍施用复合肥 (600kg/hm²) 做基肥，本研究的施肥制度就按照当地常规稻作的施肥习惯。而洞庭湖区双季稻施肥水平一般是[29-31]：每季氮肥 (N) 150 kg/hm²；磷 (P_2O_5) 为 75 kg/hm²；钾肥 (K_2O) 为 150 kg/hm²。本研究在目前的 N、P 养分投入水平下，稻鸭共生土壤子系统存在严重的 N 和 P 亏缺，可能的原因之一是肥料 N、P 投入量不足引起的。

(2) 鸭子系统输入的 N 和 P 主要是饲料带入，饲料 N 和 P 分别占 98.6% 和 99.6%，鸭子对系统外投入依赖高，自持能力较差。鸭产品本身所固定的 N 和 P 输出分别为 23.98 kg/hm² 和 3.10 kg/hm²。

(3) 稻鸭共生期，每只鸭平均日排鲜粪为 0.12kg。稻鸭共生可对稻田增加氮 14.27 kg/hm²，增加磷 16.10 kg/hm²，增加有机碳 157.54 kg/hm²。鸭粪 N、P 参与当季的稻田养分循环，其循环率分别为 10.66% 和 28.16%。

(4) 常规稻作和稻鸭共生系统外 N 输入均大于系统内 N 输出，但系统内 P 输出均大于系统外 P 输入。"稻鸭共生"生态系统 N、P 输出分别为 153.50 kg/hm² 和 59.03 kg/hm²，且 N、P 输出仍以水稻籽粒 N、P 和水稻秸秆 N、P 为主，说明初级生产在该系统 N、P 循环中十分重要。"稻鸭共生"生态系统 N、P 归还量均高于常规稻作，提高了稻田自我维持力。

(5) 因试验条件限制，本季研究未测定稻田 N 和 P 淋失量。纪雄辉等[29-31]研究得出洞庭湖区种植双季稻期间施用尿素的全氮径流损失占施氮量的 2.57%；施用化肥和猪粪的磷素径流流失分别占施 P 量的 0.86% 和 1.44%；稻田土壤的总磷淋失很小且施磷与不施磷无差异。因此，本文未将稻田 N 和 P 淋失量列入 N 和 P 的循环中。同时本研究也未测定稻田 N_2O 释放和 NH_3 挥发途径所输出的氮，据他人研究[2,4,21]，稻田养鸭能抑制氨挥发和减少甲烷排放，但却增加了 N_2O 释放。因此，应从环境友好型农业角度考虑"稻鸭共生"生态系统 N 和 P 产投结构。

References:

[1] Gao W S, Chen Y Q, Liang L. Basic principles and technology supporting for circular agriculture development. Research of Agricultural Modernization, 2007, 28(6): 731-734.

[2] Li C F, Cao C G, Zhan M, Yuan W L, Wang J P, Dai G Z. Nitrous oxide emission from rice-duck complex ecosystem. Agricultural Sciences in China, 2008, 41(9):2895-2901.

[3] Huang Y, Wang H, Huang H, Feng Z W, Yang Z H, Luo Y C. Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105:181-193.

[4] Yuan W L, Cao C G, Li C F, Zhan M, Cai M L, Wang J P. Methane and nitrous oxides emissions from rice-duck and rice-fish complex ecosystems and the evaluation of their economic significance. Agricultural Sciences in China, 2009, 8(10):1246-1255.

[5] Fu Z Q, Huang H, Liao X L, Hu Y, Xie W, He B L. Effect of ducks on CH_4 emission from paddy soils and its mechanism research in the rice-duck ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5):2107-2114.

[6] Yang Z P, Liu X Y, Huang H, Liu D Z, Hu L D, Su W, Tan S Q. A study on the influence of rice-duck intergrowth on spider, rice diseases, insect and weeds in rice-duck complex ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12):2756-2760.

[7] Liu X Y, Yang Z P, Huang H, Hu L D, Liu D Z, Tan S Q, Su W. A study on the rice sheath blight′s developing rules in rice-duck compounded ecosystem of wetland. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11):2580-2584.

[8] Quan G M, Zhang J E, Chen R, Xu R B. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (9): 2023- 2028.

[9] Li C F, Cao C G, Wang J P, Pang S G, Ye C, Ye W, Liu K, Zeng J F. Dynamic variations and losses of N in floodwater of paddy fields in integrated rice-duck and rice-fish ecosystems. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(10):2126-2132.

[10] Wang J P, Cao C G, Jin H, Wang C F, Liu F H. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields. Agricultural Sciences in China, 2006, 39(10):2001-2008.

[11] Wang J P, Cao C G, Li C F, Jin H, Yuan W L, Zhan M. Elgal change in paddy water under rice-duck complex ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8):4353-4360.

[12] Yu S M, Ouyang Y N, Zhang Q Y, Peng G, Xu D H, Jin Q Y. Effects of rice-duck farming system on Oryza sativa growth and its yield. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7):1252-1256.

[13] Quan G M, Zhang J E, Teng L L, Chen R, Xu R B. Effects of integrated rice-duck farming on rice root growth. Journal of South China Agricultural University, 2008, 29(3):1-5.

[14] Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a wetland rice-duck complex ecosystem. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(2):117-121.

[15] Zhan M, Cao C G, Wang J P, Dai G Z. Analysis of diversity of soil microbial community of the wetland rice-duck and rice-fish complex ecosystem. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(6):1179-1183.

[16] Li C F, Cao C G, Xu Y H, Wang J P, Zhan M, Yang X W, Pang H D. Dynamics of soil microbial biomass N and soil enzymes activities in rice-duck and rice-fish ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8):3905-3912.

[17] Li C F, Cao C G, Pan S G, Huang F, Dai G Z, Wang J P, Zhan M, Gong W L. The dynamics and availability of soil fixed ammonium in rice-duck complex ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6):2729-2737.

[18] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhan M, Pan S G. Dynamics of soil soluble organic N in rice-duck and rice-fish ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5):2541-2550.

[19] Xiang P A, Huang H, Hang M, Gan D X, Zhou Y, Fu Z Q. Studies on technique of reducing methane emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance. Agricultural Sciences in China, 2006, 5(10):758-766.

[20] Xiang P A, Huang H, Gan D X, Huang M. An environmental economics analysis of a rice-duck ecological management technique with no-tillage. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):1981-1986.

[21] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhan M, Yuan W L, Gao C, Pan S G. Studies on nitrogen cycling in integrated rice-duck, rice-fish ecosystem. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4):1326-1334.

[22] Lu R K. Analytical Methods for Agricultural Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 106-163, 308-315, 421-428.

[23] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P K. Effects of dicyandia-mide, farmyard manure and irrigation on crop yields and am-monia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryz asativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36: 207-214.

[24] Li J M, Li D C, Xu M G, Shen H P, Qin D Z. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1610-1613.

[25] Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhan M, Cai M L. Phosphorus variations of paddy fields in rice-duck and rice-fish ecosystem. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2):126-131.

[26] Wan Z H, Yuan J M, Guo Y M, Zhao J, Wang Z. Research in decreasing nitrogen and phosphorus excretion by using phytase in combination with

protease and compound enzyme in broiler diet. Journal of China Agricultural University, 2009,14 (5):80-85.

[27] Keshavarz K, Austic R E. The use of low-protein, low-phosphorus, amino acid and phytase supplemented diet s on laying hen performance and nitrogen and phosphorus excretion. Poultry Science, 2004, 83: 75-83.

[28] Lu Y B, Wang L F. System analysis for matter cycling in agroecosystem. Journal of Ecology,1990,9(3):38-41.

[29] Ji X H, Zheng S X, Lu Y H, Liao Y L. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on surface water N dynamics and its runoff loss in double cropping paddy fields in Dongtinghu Lake area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (7): 1432-1440.

[30] Ji X H, Zheng S X, Liu Q, Lu Y H. Effect of organic manure application on runoff phosrus loss from rice-rice field in the Middle Reach of the Yangtze River. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2006,32(3):283-287.

[31] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, Liao Y L. Effect of fertilization on nutrient leaching loss from different paddy soils in Dongtinghu Lake area. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(4):663-671.

参考文献:

[1] 高旺盛,陈源泉,梁龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系. 农业现代化研究,2007,28(6):731-734.

[2] 李成芳,曹凑贵,展茗,袁伟玲,汪金平,代光照. 稻鸭共作生态系统中氧化亚氮排放及温室效应评估. 中国农业科学,2008,41(9):2895-2901.

[6] 杨志平,刘小燕,黄璜,刘大志,胡立冬,苏伟,谭泗桥. 稻田养鸭对稻鸭复合系统中病、虫、草害及蜘蛛的影响. 生态学报,2004,24(12):2756-2760.

[7] 刘小燕,杨志平,黄璜,胡立冬,刘大志,谭泗桥,苏伟. 湿地稻-鸭复合系统中水稻纹枯病的变化规律. 生态学报,2004,24(11):2580-2584.

[8] 全国明,章家恩,陈瑞,许荣宝. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响. 应用生态学报,2008,19(9):2023-2028.

[9] 李成芳,曹凑贵,汪金平,潘盛刚,叶成,叶威,刘铠,曾金凤. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田田面水的 N 素动态变化及淋溶损失. 环境科学学报,2008,28(10):2126-2132.

[10] 汪金平,曹凑贵,金晖,王昌付,刘丰颢. 稻鸭共生对稻田水生生物群落的影响. 中国农业科学,2006,39(10):2001-2008.

[11] 汪金平,曹凑贵,李成芳,金晖,袁伟玲,展茗. 稻鸭共育稻田水体藻类动态变化. 生态学报,2009,29(8):4353-4360.

[12] 禹盛苗,欧阳由男,张秋英,彭钢,许德海,金千瑜. 稻鸭共育复合系统对水稻生长与产量的影响. 应用生态学报,2005,16(7):1252-1256.

[13] 全国明,章家恩,滕丽丽,陈瑞,许荣宝. 稻鸭共作对水稻根系生长的影响. 华南农业大学学报,2008,29(3):1-5.

[14] 杨志辉,黄璜,王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究. 土壤通报,2004,35(2):117-121.

[15] 展茗,曹凑贵,汪金平,代光照. 稻鸭、稻鱼复合生态系统土壤微生物多样性特征分析. 土壤学报,2008,45(6):1179-1183.

[16] 李成芳,曹凑贵,徐拥华,汪金平,展茗,杨学伟,庞海东. 稻鸭与稻鱼生态系统土壤微生物量 N 和土壤酶活性动态. 生态学报,2008,28(8):3905-3912.

[17] 李成芳,曹凑贵,潘圣刚,黄丰,代光照,汪金平,展茗,龚伟玲. 稻鸭共作生态系统稻田土壤固定态铵含量及有效性. 生态学报,2008,28(6):2729-2737.

[18] 李成芳,曹凑贵,汪金平,展茗,潘圣刚. 稻鸭、稻鱼共作生态系统土壤可溶性有机 N 的动态和损失. 生态学报,2009,29(5):2541-2550.

[20] 向平安,黄璜,甘德欣,黄梅. 免耕稻-鸭生态种养技术的环境经济学分析. 生态学报,2005,25(8):1981-1986.

[21] 李成芳,曹凑贵,汪金平,展茗,袁伟玲,高超,潘圣刚. 稻鸭稻鱼共作生态系统 N 素平衡的研究. 农业环境科学学报,2008,27(4):1326-1334.

[22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社,2000: 106-163,308-315,421-428.

[24] 李菊梅,李冬初,徐明岗,申华平,秦道珠. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素. 生态环境,2008, 17(4): 1610-1613.

[25] 李成芳, 曹凑贵,汪金平,展茗,蔡明历. 稻鸭、稻鱼共作对稻田 P 素动态变化的影响. 长江流域资源与环境,2009,18(2):126-131.

[26] 万振环,袁建敏,呙于明,赵剑,王忠. 蛋白酶和植酸酶联合添加降低肉仔鸡氮磷排放的研究. 中国农业大学学报,2009,14 (5):80-85.

[28] 卢兵友, 王留芳. 农业生态系统物质循环的系统分析. 生态学杂志, 1990, 9 (3): 38-41.

[29] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,廖育林. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响. 应用生态学报,2007, 18 (7):1432-1440.

[30] 纪雄辉,郑圣先,刘强,鲁艳红. 施用有机肥对长江中游地区双季稻田磷素径流损失及水稻产量的影响. 湖南农业大学学报:自然科学版,2006,32(3):283-287.

[31] 纪雄辉,郑圣先,石丽红,廖育林. 洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响. 土壤学报,2008,45(4):663-671.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 4 February, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

编辑部主任：孔红梅　　**执行编辑**：刘天星　段　靖

生　态　学　报
（SHENGTAI　XUEBAO）
（半月刊　1981 年 3 月创刊）
第 31 卷　第 4 期　（2011 年 2 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 4　2011

编　　辑　《生态学报》编辑部
　　地址：北京海淀区双清路 18 号
　　邮政编码：100085
　　电话：（010）62941099
　　www. ecologica. cn
　　shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
主　　编　冯宗炜
主　　管　中国科学技术协会
主　　办　中国生态学学会
　　中国科学院生态环境研究中心
　　地址：北京海淀区双清路 18 号
　　邮政编码：100085
出　　版　科　学　出　版　社
　　地址：北京东黄城根北街 16 号
　　邮政编码：100717
印　　刷　北京北林印刷厂
发　　行　科　学　出　版　社
　　地址：东黄城根北街 16 号
　　邮政编码：100717
　　电话：（010）64034563
　　E-mail：journal@ cspg. net
订　　购　全国各地邮局
国外发行　中国国际图书贸易总公司
　　地址：北京 399 信箱
　　邮政编码：100044
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

Edited by Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Tel：（010）62941099
www. ecologica. cn
Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences，CAS
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Published by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing　100717，China
Printed by Beijing Bei Lin Printing House，Beijing 100083，China
Distributed by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing 100717，China
Tel：（010）64034563
E-mail：journal@ cspg. net
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
Add：P. O. Box 399 Beijing 100044，China

ISSN 1000-0933

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q
国内外公开发行　**国内邮发代号** 82-7　**国外发行代号** M670　**定价** 70.00 元