

稻鸭共作生态系统中 N_2O 排放及经济效益评价

袁伟玲, 曹凑贵*, 汪金平, 展 茗, 李成芳, 谢宁宁

(华中农业大学作物栽培与生理生态研究中心, 湖北武汉 430070)

摘要: 稻鸭共作技术是中国传统农业的精华, 研究稻鸭共作生态系统中 N_2O 排放产生的环境效应并对其进行经济价值进行评价, 为进一步开发利用这一经典农艺提供理论基础和实践依据。采用静态箱技术, 研究稻鸭共作生态系统 N_2O 排放规律, 并运用增温潜势对稻鸭共作生态系统 N_2O 排放的温室效应及经济效益进行了估算。结果表明, 稻鸭共作生态系统 N_2O 排放呈现明显的日变化和季节变化。 N_2O 日变化与鸭子的活动呈现明显的相关性, 其排放峰值出现在清晨和 16:00; N_2O 季节变化幅度较大, 排放峰值出现在水稻成熟期。在施用等量基肥条件下, 稻鸭稻田排放的 N_2O 高于常规稻田, 其平均排放通量分别为 $(149.46 \pm 25.81) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(138.84 \pm 25.26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 产生的温室效应成本分别为 $283.14 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $265.47 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除去 N_2O 排放产生温室效应的环境成本, 采用稻鸭生态种养技术的经济效益为 $7687.66 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比常规不养鸭稻田增加 $1932.33 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见, 稻鸭共作技术仍具有较好的推广价值。

关键词: N_2O 排放; 稻鸭共作生态系统; 温室效应; 经济效益

文章编号: 1000-0933(2008)07-3060-07 中图分类号: X823, X511 文献标识码: A

Nitrous oxide emission from rice-duck complex ecosystem and the evaluation of its economic significance

YUAN Wei-Ling, CAO Cou-Gui*, WANG Jin-Ping, ZHAN Ming, LI Cheng-Fang, XIE Ning-Ning

Crop production, Physiology and Ecology Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3060 ~ 3066.

Abstract: The rice-duck ecological system is one of the classics practices from the traditional Chinese agriculture. Study on its economic significance and nitrous oxide emission of this practice can provide theoretical and practical basis for further development and utilization of this classical agricultural technique. Nitrous oxide emission from rice-duck complex ecosystem was measured in situ by using static chambers technique, and the greenhouse effect of nitrous oxide using global warming potentials (GWPs) and its economic significance were assessed. Results were shown that nitrous oxide emission from rice-duck complex ecosystem presented distinct diurnal and seasonal variation. Diurnal variation of nitrous oxide emission was highly correlated with the activities of ducklings. The peaks of nitrous oxide emissions were normally increased in the early morning and at 16:00 due to the frequent movement of ducklings at these time period. The seasonal variation was varying, and the peak of nitrous oxide emission appeared at the ripening stage. Under the same urea application as basal fertilizers, the nitrous oxide flux from RD was higher than that from CK, and the mean emission rate was about $(149.46 \pm 25.81) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and $(138.84 \pm 25.26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. The cost of greenhouse effect was

基金项目: 国家重大科技专项资助项目(2004BA520A02)

收稿日期: 2007-11-23; 修订日期: 2008-04-22

作者简介: 袁伟玲(1977~), 女, 湖北随州人, 博士生, 主要农田生态系统服务功能研究。E-mail: ywling@webmail.hzau.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Foundation of Key Science of China (No. 2004BA520A02)

Received date: 2007-11-23; Accepted date: 2008-04-22

Biography: YUAN Wei-Ling, Ph. D. candidate, mainly engaged in agricultural ecosystem and valuation of service function. E-mail: ywling@webmail.hzau.edu.cn

283.14 $\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 265.47 $\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. In addition to the achieved economic benefits of 7687.66 $\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, which is 1932.33 $\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ more than those who adopted a conventional without duck technique, respectively. Rice-duck complex ecosystem is still populated by farmer with its economy benefit.

Key Words: nitrous oxide emission; rice-duck complex ecosystem; greenhouse effect; economic benefit

农田生态系统是大气 N_2O 的重要来源之一。虽然 N_2O 在大气中的浓度和年增长率低于 CO_2 , 但它的潜在温室效应却约为 CO_2 的 190~270 倍, 为 CH_4 的 4~21 倍, 同时 N_2O 大量产生可能引起臭氧层的破坏, 影响人们的生存健康^[1]。因此, N_2O 在大气中浓度的增加及其排放目前倍受人们关注。稻田是人工湿地中分布最广、面积最大的农田单位。由于淹水种稻, 土壤每年有 4~8 个月为水层所掩盖, 在冬秋两季或冬闲或种旱作植物, 这种干湿交替促进了 N_2O 的形成与产生。此外, 水稻生育期间, 稻田频繁的干湿交替可改善土壤的通气性和有效氧, 有利于硝化-反硝化进行, 从而产生大量的 N_2O ^[2]。因此, 评价人类活动对稻田 N_2O 释放的影响及规律, 对降低温室气体排放、缓解温室效应具有重大的意义。

稻鸭共作生态系统是我国南方稻作区主要的一种综合利用种养模式, 具有悠久的历史。相关研究表明^[3~7]: 稻鸭共生可利用鸭子的活动, 有效控制稻田病虫害、杂草; 减少农药对环境的污染; 提高土壤肥力; 促进水稻的生长等方面作用。已有的研究表明^[8], 稻鸭共作能显著降低 CH_4 的排放量, 其日变化规律与日温变化基本一致, 而季节变化主要随着水稻的生育期及稻田土壤含碳量的变化而变化。然而, 目前对稻鸭共作生态系统中 N_2O 释放的研究却较少。本文在对稻鸭共作生态系统 N_2O 的排放规律研究的基础上, 运用增温潜势对稻鸭共作生态系统 N_2O 排放的温室效应及经济效益进行了估算, 旨在为进一步开发利用这一经典农艺提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在华中农业大学试验农场。土壤为第四纪黄土沉积物发育的水稻土, 耕层土壤厚 20cm, 下为 10cm 厚的犁底层。土壤全 N $0.35 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 P $1.17 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 $16.76 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $12.1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $0.52 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 6.98。前茬为油菜。

1.2 试验设计及田间管理

试验设 2 个处理: (1) 放鸭 (每小区 6 只) (RD); (2) 不放鸭 (常规稻田) (CK), 各小区随机区组设计, 3 次重复。小区面积为 140m^2 。中稻品种为两优培九 (*Oryza sativa* Liangyoupeijiu), 鸭为本地麻鸭 (*Tadorna*)。

养鸭处理田间开挖围沟深 30cm、宽 40 cm, 以便鸭子嬉水和取样。小区之间用泥巴砌成田埂, 覆上地膜, 防止水肥串流。以 4 指规格尼纶丝网沿田埂围隔, 围网高度以 0.6~0.8 m, 以防鸭逃走。水稻种植方式以宽窄行栽插。2007 年 5 月 1 日播种, 5 月 30 日移栽, 水稻移栽后 15d 后, 放入 15~20 日龄的雏鸭, 8 月 20 日水稻齐穗期将鸭取出。鸭放养期间, 根据田间饵料情况酌情补饲料, 在水稻全生育期不进行化学除草治虫、不施肥。养鸭期间田间水位保持 10cm, 收鸭后稻田不再灌溉。

1.3 N_2O 采集、测定及计算

采用密闭箱-气相色谱法测定稻田 N_2O 排放量。采样箱大小为 $60 \text{cm} \times 60 \text{cm} \times 110 \text{cm}$ 。水稻移栽后第 3 天起, 每星期采样 1 次; 在水稻的分蘖期盛期和孕穗期, 每隔 4h 测定其日变化。采样时间间隔为 10 min, 分别为关箱后的 0、10、20、30min, 每次抽样 20ml。经改装的 Shimadzu GC-14B 气相色谱仪分析气样中 N_2O 浓度, 检测器 ECD, 检测温度 300°C , 柱温 65°C , 载气流速 $40 \text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 。 N_2O 流通量根据下面方程计算^[9]:

$$F = \rho \cdot h \cdot dC / dt \cdot 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中, F 为 N_2O 流通量 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 为标准状态下 N_2O 密度; h 为箱高; dC/dt 为采样箱内 N_2O 浓度变化率, T 为采样过程中采样箱内平均温度 ($^\circ\text{C}$)。

稻田生态系统 N_2O 气体排放对全球变暖有着重要影响,通常用增温潜势(GWP,即 Global Warming Potentials, CO_2 的 GWP 为 1)来表示相同质量的不同温室气体对温室效应增强的相对辐射效应。对于 100a 时间尺度的气候变化, N_2O 的 GWP 为 320。将相同质量的 N_2O 气体换算为等温室效应的 CO_2 ,运用造林成本和碳税法的均值,计算其温室效应的价值^[10]。

$$M_e = 0.2729 \times \alpha \times M; \quad (2)$$

$$V_c = 1/2(C_t + C_{f,\text{CO}_2}) \times M_e \quad (3)$$

式中, M_e 为根据增温潜势将 N_2O 换算为纯 C 的量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); α 为 GWP 值; M 为 N_2O 排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。 V_c 为 CO_2 排放的平均经济价值($\text{yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$), C_t 为排放 CO_2 的碳税($1.245 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_{f,CO_2} 为固定 CO_2 的造林成本 ($0.2609 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.4 土样采集及测定

采样方式为 S 形 5 点采样法,土样采集从 5 月 25 日起,每隔 7~9d 采次样至 9 月 7 日。土样采耕作层 0~20cm 表土,混匀,送回实验室进行前处理:取部分新鲜土壤用以测定。土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 。土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提-FIAstar5000 连续流动注射分析仪测定^[11]。

1.5 数据处理

试验各处理均重复 3 次,结果取其平均值。采用 SAS(6.12)软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 的变化

从图 1 可看出,施肥后土壤 NH_4^+ 含量迅速升高,并在 1 周后达到最大值,随后迅速下降,7 月 1 日出现一低值,随后有所回升,并趋于稳定,而在 9 月 7 日降到最低。在稻鸭共作期间,处理 RD 土壤 NH_4^+ 含量显著高于处理 CK($p < 0.01$)。在水稻全生育期,处理 RD 土壤 NH_4^+ 平均含量为 $(8.75 \pm 1.03) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是处理 CK 的 1.08 倍($p < 0.05$)。在水稻营养生长期,稻鸭共作系统土壤 NO_3^- 含量远小于土壤 NH_4^+ ,而在成熟期,由于土壤良好通气性有利于 N 矿化,显著提高了硝化作用,使得土壤 NO_3^- 含量迅速增加。

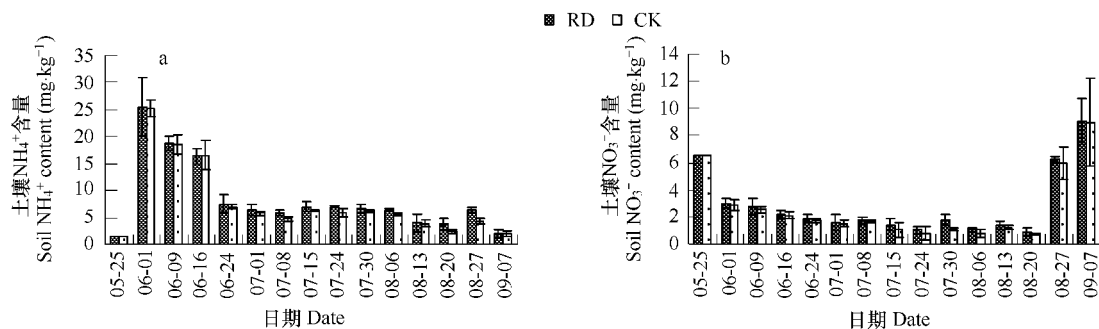


图 1 土壤无机氮变化

Fig. 1 Variations of soil inorganic nitrogen

(a) 土壤 NH_4^+ Soil NH_4^+ content; (b) 土壤 NO_3^- Soil NO_3^- content

2.2 N_2O 排放规律

图 2 显示了水稻分蘖盛期和孕穗期 N_2O 日变化。处理稻鸭 N_2O 排放通量日变化规律与鸭子的活动基本一致。早晨气温低,鸭子活动较频繁, N_2O 排放处于较高水平,随着气温的升高,鸭子活动量减少, N_2O 排放量逐渐减少至 12:00 最低,然后又逐渐升高,16:00 时又一次达高峰,随后逐渐降低,夜间排放量最小。而常规稻田中 N_2O 日排放通量却无明显变化。在水稻分蘖盛期和孕穗期,养鸭稻田的日 N_2O 排放明显高于 CK,白天差异较显著,而夜间无明显差异。这可能与 N_2O 在水和土壤中扩散运移及鸭子的活动有关。夜晚稻田可溶性 N_2O 扩散和运移缓慢,致使 N_2O 释放较少;而白天由于温度的升高和鸭子活动的频繁, N_2O 释放

增加^[12]。

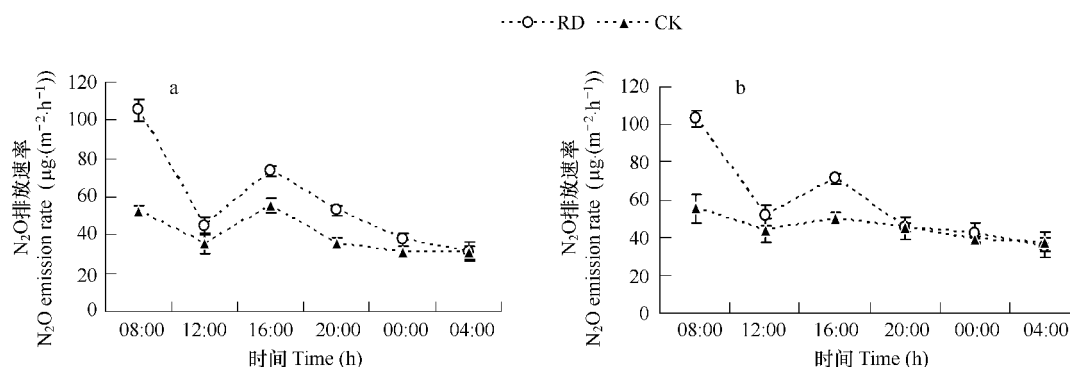


图2 N_2O 排放的日变化

Fig. 2 Daily variations of nitrous oxide emission in different growth periods of rice

(a) 水稻分蘖盛期 full tillering stage; (b) 水稻孕穗期 booting stage

图3显示了稻鸭共生生态系统中 N_2O 排放通量的季节变化。处理稻鸭和常规稻田中 N_2O 排放通量分别为 $(48.08 \sim 844.46) \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 $(35.62 \sim 828.92) \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。在水稻全生育期,稻鸭和常规稻田 N_2O 平均排放通量分别为 $(149.46 \pm 25.81) \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 $(138.84 \pm 25.26) \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 。水稻齐穗期前, N_2O 排放通量保持着较低值,这可能是由于鸭子的放入,田间一直保存约 5cm 水层,土壤处于厌氧状态,土壤 NO_3^- 产生率高于 NH_4^+ 的消耗率,从而减少了 N_2O 释放^[13]。鸭子取出前,处理稻鸭中 N_2O 平均排放通量为 $(63.00 \pm 9.05) \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,仅占全生育期排放量的 42.15%,且 N_2O 排放量显著高于处理 CK ($p < 0.05$)。到水稻齐穗至成熟期,鸭子被取出,尽管这一期间有较多根脱落物和腐败物进入土壤,但由于水稻田临近收割,表层干涸,破坏了淹水厌氧环境, N_2O 排放通量迅速升高,并在成熟收获时达到最大值^[14~16]。

2.3 N_2O 累积排放量及温室效应

稻田土壤通过硝化作用将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 和 NO_3^- ;在缺乏 O_2 的条件下,通过反硝化作用将 NO_2^- 和 NO_3^- 还原为气态氮(N_2 和氮的氧化物,包括 N_2O)。稻田 N_2O 排放量与土壤通气状况、土壤水分含量、施肥状况、土壤有机质、土壤 pH 值等因素有关^[17~19]。图4显示了稻鸭共生生态系统中 N_2O 的累积排放量。在水稻分蘖期间, N_2O 累积排放量呈现上升趋势的一个主要原因可能是移栽前施用一定量的基肥,为 N_2O 的产生提供了足够的氮源,促进了 N_2O 的形成。从水稻整个生育期 N_2O 排放量来看,稻鸭稻田和常规稻田 N_2O 排放量分别为 $(430.59 \pm 54.25) mg \cdot m^{-2}$ 和 $(403.71 \pm 50.47) mg \cdot m^{-2}$,养鸭稻田 N_2O 排放量比常规稻田增加

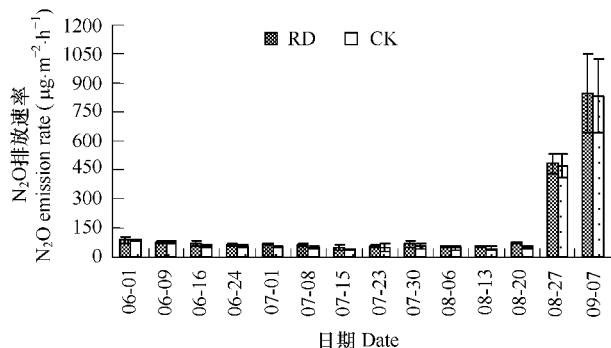


图3 稻鸭共生生态系统 N_2O 排放的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of nitrous oxide emission in rice-duck complex ecosystem

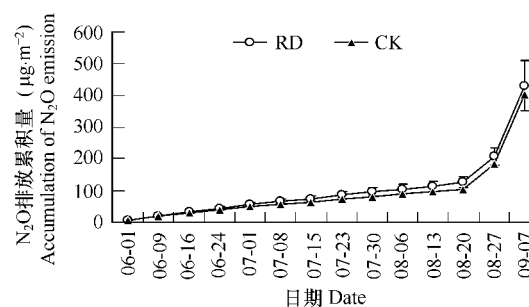


图4 稻鸭复合生态系统 N_2O 累积排放量

Fig. 4 Accumulation of nitrous oxide emission in rice-duck complex ecosystem

26.89 mg·m⁻²。其温室效应差为 23.48 kg C·hm⁻²。

2.4 稻鸭共作生态系统经济评价

水稻收获后,养鸭处理和常规处理的稻谷产量分别为 6236,6188 kg·hm⁻²。由于在水稻栽培期间未施用农药及除草剂,养鸭稻田产出的稻谷销售价格为 1.8 yuan·kg⁻¹,比常规稻田产出的稻谷价格高 0.2 yuan·kg⁻¹,养鸭处理和常规处理的销售额分别为 11224.8 yuan·hm⁻²,9900.8 yuan·hm⁻²,养鸭处理比常规处理增收 1324yuan·hm⁻²。虽然养鸭生产模式增加了养鸭成本 1352 yuan·hm⁻²,但是鸭子销售后获得收益 2013yuan·hm⁻²,除去直接生产成本,获利 661 yuan·hm⁻²。因此稻鸭处理比常规不养鸭稻田增加收益 1950 yuan·hm⁻²(表 1)。

N₂O 排放导致了全球温室效应的增强,稻田作为一个主要的温室气体排放源被广泛研究。本实验中,稻鸭稻田和常规稻田 N₂O 排放量分别为 430.59 mg·m⁻²和 403.71 mg·m⁻²。根据增温潜势,计算出 N₂O 排放产生温室效应成本分别为 283.14yuan·hm⁻²和 265.47yuan·hm⁻²。考虑到 N₂O 排放的环境成本,结合稻鸭共作技术的投入与产出,采用稻鸭生态种养技术的经济效益为 7687.66 yuan·hm⁻²,比常规不养鸭稻田增加 1932.33 yuan·hm⁻²(表 1)。

表 1 养鸭和常规稻田经济收益比较

Table 1 A comparison of economical income under two different treatments(yuan·hm⁻²)

处理 Treatment	产值 Production value		成本 Financial cost						N ₂ O 排放产生 温室效应成本 Environmental cost of N ₂ O emission	经济效益 Economic benefit
	稻谷 Paddy	鸭子 Duck	鸭苗及饲料 Ducklings and forage	尼龙网 Nylon net	种子 Seed	机耕 Cultivation by tractor	劳力 Labor	其它 other		
养鸭 With ducks	11224.8	2013	1352	245	230	420	1840	1180	283.14	7687.66
常规 Without ducks	9900.8				230	420	2050	1180	265.47	5755.33

3 讨论

关于稻田 N₂O 排放的研究,国内外已有众多的报道^[20~23],但研究结果差异较大,这可能与各研究地点和试验条件不同有关。郑循华等研究表明,N₂O 的日变化有随机型和规律型两种模式,规律型主要出现在日温差相对较大的晴天,且土壤水分含量和养分状况相对稳定,N₂O 日变化表现为明显的单峰型,极大值出现在 11:00~16:00 之间^[24]。本研究中稻鸭处理 N₂O 日变化与鸭子的活动规律基本一致,与郑循华的研究有较大的差异。一方面可能是由于稻田养鸭抑制了稻田杂草、浮游生物和其他需氧有机生物生长,被水体生物所消耗的溶解氧减少,水体溶解氧量增加,土壤 Eh 值升高,故 N₂O 释放增加^[8];另一方面,鸭子栖息和活动,加速了土壤与大气的交换,增加了土壤与氧气接触的机会,改善了土壤的氧化还原状况,导致 N₂O 释放的增加^[8]。同时,鸭子的活动增加了土壤与水体的溶解氧,使得鸭子粪便、饲料与尿素水解产生的 NH₄⁺ 被氧化为 NO₃⁻,提高了反硝化底物-土壤 NO₃⁻ 含量(图 1),因此反硝化产生的 N₂O 量增加^[12]。

N₂O 是稻田生物硝化与反硝化作用的中间产物,受氧的有效性、硝化与反硝化反应底物无机氮的影响^[24]。Henckel 和 Conrad^[23] 研究表明,在厌氧条件下,土壤 NO₃⁻ 产生率高于 NH₄⁺ 的消耗率,且氧的相对缺乏抑制了硝化作用进行,从而抑制了 NO₃⁻ 的生成,进而抑制了 N₂O 的形成与释放,此时少量 N₂O 释放;而土壤良好通气性有利于 N 矿化,显著提高了硝化作用产生的 N₂O 的释放;同时硝化作用提高了作为反硝化反应底物 NO₃⁻ 的量,有利于反硝化进行,从而促进 N₂O 释放,导致 N₂O 大量产生(图 3)。本文主要是针对具有良好经济效益并正在进行示范推广的稻鸭生态种养技术进行 N₂O 排放的研究。因此,未将 N₂O 排放的影响因素作为研究重点。

对某项稻田温室气体的评价,应同时综合考虑农户的直接经济效益,否则,该项技术不可能得到有效、全

面推广。现有的水管理、沼渣肥替代纯有机肥等稻田温室气体减排方法,由于需要投入大量人力和物力,而且农户经济收入并不显著,甚至可能会降低,难以满足农户的需求。在稻鸭共生生态系统中,鸭子长期露宿于田间,其活动与觅食搅动了土壤,加强了土壤的通气,同时由于鸭子大量觅食田间杂草和浮游生物避免了因杂草和浮游生物的呼吸作用对水体溶氧的消耗,水体溶解氧增加,提高了甲烷氧化菌的活性,促使土壤产生的甲烷被较快地氧化,从而降低甲烷的排放通量。此外,稻鸭共生还有利于土壤中有有机碳、全氮、碱解氮的提高^[25]。尽管稻鸭共生增加了 N_2O 的排放,但由于稻鸭生态种养技术有效地控制稻田病虫害的发生,达到不施用农药增产增收的目的,而且还可产出无污染大米、鸭,经济效益和社会效益比较显著。本研究在未考虑稻鸭共作降低 CH_4 的排放所具有的环境效益的前提下,对稻鸭生态种养的直接经济效益和 N_2O 排放产生的温室效应进行了分析,结果表明,采用稻鸭生态种养技术的经济效益为 $7687.66 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$,比常规不养鸭稻田增加 $1932.33 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,稻鸭共生仍具有较好的推广价值。

4 结论

(1)与常规稻作相比,稻鸭共作 N_2O 排放具有不同的日变化模式, N_2O 日变化与鸭子的活动呈现明显的相关性,在清晨和 16:00 时 N_2O 的排放速率较高。

(2)与常规稻作相比,稻鸭共作 N_2O 排放具有类似的季节变化模式。排放峰值出现在水稻成熟期;与常规稻作相比,稻鸭共作生态系统显著提高 N_2O 释放。

(3)稻鸭稻田和常规稻田 N_2O 累积排放量分别为 $430.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $403.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$,稻鸭处理比常规不养鸭稻田增加直接收益为 $1950 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$,考虑到 N_2O 排放产生温室效应的环境成本,采用稻鸭生态种养技术的经济效益为 $7687.66 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$,比常规不养鸭稻田增加 $1932.33 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

References:

- [1] Li J, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Research advance on greenhouse gases in agriculture ecosystem. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 4(27): 740—749.
- [2] Yan X, Du L, Shi S, *et al.* Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration. *Biol Fertil Soils*, 2000, 32: 60—66.
- [3] Ekurei E, Ryohei Y. Comparative studies on behavior, weeding and pest control of duck free ranged in paddy fields. *Jpn. Poult. Sci*, 1996, 33: 261—267.
- [4] Deng Q H, Pan X H, Wu J F, *et al.* Ecological effects and economic benefits of rice-duck farming. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4): 582—586.
- [5] Wang H and Huang H. Analysis on ecological and economic benefits of complex ecosystem in wetland paddy fields. *Chin. Agric. Sci. Bull*, 2002, 18(1): 71—75.
- [6] Wang H, Huang H, Yang Z H, *et al.* Studies on integrated benefits of wetland rice-duck complex ecosystem. *Rural. Eco. Environ*, 2003, 3: 45—48.
- [7] Xiang P A, Huang H, Huang M, *et al.* Studies on technique of reducing methane emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance. *Chin. Agric. Sci*, 2006, 5(10): 758—766.
- [8] Huang Y, Wang H, Huang H, *et al.* Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105: 181—193.
- [9] Qin X B, Li Y E, Liu K Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments. *Transactions of the CSAE*, 2006, 7(22): 143—148.
- [10] Xiao Y, Xie G D, Lu C X, *et al.* The gas regulation function of rice paddy ecosystems and its value. *Journal of Natural Resources*, 2004, 5(19): 617—623.
- [11] Bao S D. *Soil agriculture chemistry analysis*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. 42—56.
- [12] Liu H, Zhao P, Sun G C, *et al.* Characteristics of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from winter fallowed paddy fields in hilly area of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 57—62.
- [13] Henckel T, Conrad R. Characterization of microbial NO production, N_2O production and CH_4 oxidation initiated by aeration of anoxic rice field soil. *Biogeochemistry*, 1998, 40: 17—36.

- [14] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impact of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agroecosystem in Southeast China. *Chemosphere-Global Change Sci*, 2000, 2: 207—224.
- [15] Huang S H, Pant H K, Jun L, *et al.* Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils. *Ecological Engineering*, 2007, 31: 9—15.
- [16] Kreye C, Dittert K, Zheng X H. Fluxes of methane and nitrous oxide in water-saving rice production in north China. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2007, 77: 293—304.
- [17] Xie J F, Li Y E. Effect of Soil Temperature on N_2O Emission in Upland Farm of Beijing. *Agricultural Meteorology*, 2005, 26 (1): 7—101.
- [18] Li F M, Fan X L, Liu F. Effects of controlled release fertilizers on N_2O emission from paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (11): 2170—2174.
- [19] Zou J W, Huang Y, Zong L G. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23 (6): 758—764.
- [20] Xiong Z Q, Xin G X, Tsuruta H, *et al.* Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64: 125—133.
- [21] Bhatia A, Pathak H, Jain N, *et al.* Global warming potential of manure amended soils under rice-wheat system in the Indo-Gangetic plains. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 6976—6984.
- [22] Maljanen M, Martikkala, Koponen H T, *et al.* Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from experimental excreta patches in boreal agricultural soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 914—920.
- [23] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere*, 2005, 59: 1547—1556.
- [24] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of Temperature on N_2O Production and Emission. *Environmental Science*, 1997, 18 (5): 1—6.
- [25] Bollmann A, Conrad R. Influence of O_2 availability on NO and N_2O release by nitrification and denitrification in soils. *Global Change Biol*, 1998, 4 (4): 387—396.
- [26] Gan D X, Huang H, Huang M, Xiang P A. The Ecological Characteristics of No-Tillage Rice-Duck Complex System. The Soil Physical and Chemical Characteristic. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2004, 30 (1): 24—28.

参考文献:

- [1] 李晶,王明星,王跃思,等. 农田生态系统温室气体排放研究进展. *大气科学*, 2003, 4 (27): 740~749.
- [4] 邓强辉,潘晓华,吴建富,等. 稻鸭共育生态效应及经济效益. *生态学杂志*, 2007, 26 (4): 582~586.
- [5] 王华,黄璜. 湿地稻田养鱼、鸭复合生态系统生态经济效益分析. *中国农学通报*, 2002, 18 (1): 71~75.
- [6] 王华,黄璜,杨志辉,等. 湿地稻-鸭复合生态系统综合效益研究. *农村生态环境*, 2003, 3: 45~48.
- [7] 向平安,黄璜,黄梅,等. 稻-鸭生态种养技术减排甲烷的研究及经济评价. *中国农业科学*, 2006, 5 (10): 758~766.
- [9] 秦晓波,李玉娥,刘克樱,等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征. *农业工程学报*, 2006, 7 (22): 143~148.
- [10] 肖玉,谢高地,鲁春霞,等. 稻田生态系统气体调节功能及其价值. *自然资源学报*, 2005, 19 (5): 617~623.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. 42~56.
- [12] 刘惠,赵平,孙谷畴,等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征. *应用生态学报*, 2007, 18 (1): 57~62.
- [17] 谢军飞,李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N_2O 排放的影响. *中国农业气象*, 2005, 26 (1): 7~101.
- [18] 李方敏,樊小林,刘芳. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响. *应用生态学报*, 2004, 15 (11): 2170~2174.
- [19] 邹建文,黄耀,宗良纲. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23 (6): 758~764.
- [24] 郑循华,王明星,王跃思,等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响. *环境科学*, 1997, 18 (5): 1~6.
- [26] 甘德欣,黄璜,黄梅,等. 免耕稻鸭复合系统生态学特性研究 I. 土壤物理性状及养分动态变化. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 30 (1): 24~28.