

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1566-1572.

YANG Run, SUN Qin-ping, ZHAO Hai-yan, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1566-1572.

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润¹, 孙钦平^{2*}, 赵海燕³, 邹国元², 刘本生², 李恋卿^{1*}

(1.南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2.北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为探究沼液在稻田中的适宜用量,通过田间试验,研究不同氮素水平的沼液(0、90、157.5、225、292.5、562.5 kg·hm⁻²)对水稻产量、氮素利用率、田面水无机氮动态变化、土壤残留无机氮以及稻田氨挥发的影响。结果表明,水稻籽粒产量随沼液氮素施用量的变化符合线性加平台模型,沼液在水稻种植中的最佳氮素施用量为 213.9 kg·hm⁻²;施用沼液显著增加了田面水铵态氮浓度,施用沼液 3 d 后,田面水铵态氮浓度迅速降低,而田面水硝态氮初始浓度无明显变化;稻田氨挥发总量随沼液氮素施用量的增加而显著增加,且主要集中在沼液施用后的一周内,氨挥发所引起的氮素损失占沼液氮素量的 14.52%~17.64%;等氮量施用的沼液和化肥相比,水稻产量、氮素利用率、氮素农学生产率和土壤残留无机氮均无显著差异,而单位稻谷产量的氨挥发量显著降低 22.6%。由此可见,稻田合理施用沼液具有较好的经济效益和环境效益。

关键词:沼液;水稻;氮素利用率;氨挥发

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)08-1566-07 doi:10.11654/jaes.2016-1617

Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields

YANG Run¹, SUN Qin-ping^{2*}, ZHAO Hai-yan³, ZOU Guo-yuan², LIU Ben-sheng², LI Lian-qing^{1*}

(1.Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3.College of Resources and Environmental Sciences Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of biogas slurry application on rice yield, nitrogen (N) use efficiency, surface water mineral nitrogen (N_{min}) dynamics, soil N_{min}, and ammonia volatilization. The results showed that rice yield had a positive linear relationship with the applied biogas slurry sourced N rate when it was less than 213.9 kg·hm⁻², and rice yield could be increased by 9.05 kg per 1 kg biogas slurry sourced N applied. However, rice yield was not increased further when the biogas slurry sourced N input was higher than 213.9 kg·hm⁻². Given this, it was indicated that 213.9 kg·hm⁻² may be the reasonable application rate for this paddy field. The soil mineral N residue increased linearly with the increase of N application rate after harvest. After the slurry application, the NH₄⁺-N concentration in the surface water was reduced rapidly, and then gradually become stable, whereas slurry application had no significant effect on NO₃⁻-N concentration in the surface water. Ammonia volatilization mainly happened in the first week after fertilizer application, and the N loss caused by ammonia volatilization accounted for 14.52%~17.64% of the biogas slurry sourced N application rate. Compared to chemical fertilizer application, the rice grain yield, nitrogen use efficiency, and soil N_{min} were similar under biogas slurry application with the same amount of N, whereas the ammonia volatilization intensity (kg NH₃ per kg rice yield) was significantly reduced by 22.6%. According to the results of this study, the rational use of biogas slurry in paddy fields could have good economic and environmental benefits.

Keywords: biogas slurry; rice; nitrogen use efficiency; ammonia volatilization

收稿日期:2016-12-16

作者简介:杨润(1992—),男,硕士研究生,主要从事农业面源污染防治研究。E-mail:yangrun92@163.com

*通信作者:孙钦平 E-mail:sunqp@126.com;李恋卿 E-mail:lqli@niau.edu.cn

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(201303089-2)

Project supported: Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303089-2)

近年来,随着养殖业的集约化发展,畜禽粪便等废弃物的污染已成为影响环境的突出问题。为实现粪污无害化处理和资源化利用,畜禽养殖场纷纷建设沼气工程,这些工程发挥了巨大的作用,已成为重要的节能减排技术^[1]。沼气工程的发展产生了大量的沼液^[2],沼液中含有丰富的有机物质和氮、磷、钾等营养元素及各种氨基酸、有机酸等生物活性物质^[3]。这些物质能直接被植物吸收,对于改良土壤,提高土壤养分及农产品的产量和品质都有积极作用^[4-6]。日益增长的沼液处理需求对沼液的资源化利用提出了新的挑战,沼液在储存过程中会挥发大量的 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 等^[7]气体,引起大气污染,同时不合理施用的沼液在遇强降雨天气时,可能随雨水形成地表径流,进而成为水体富营养化的潜在威胁,推高了农业面源污染风险。

农田消纳沼液是目前较易实施且行之有效的处理办法。稻田作为人工湿地生态系统,具备土壤-微生物-植物复合系统的自我调控功能以及对污染物的综合净化能力^[8],尤其是南方较成熟的水稻产区,犁底层发育良好,渗漏风险较小^[9],在农田消纳沼液中具有较好的现实意义。稻田施用沼液,能提高土壤的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量,同时可以提高土壤的酶活性^[10]。就水稻产量和品质而言,沼液比常规施肥有利于提高稻谷产量与稻谷中蛋白质和矿质元素的积累^[11]。但沼液在稻田的施用,也可能引发新的环境问题,如氨挥发是目前稻田消解沼液较难避免的主要环境风险^[12]。国内关于沼液在稻田中施用的适宜用量尚无定论,如何在维持水稻产量和维护稻田环境的前提下,获取沼液施用的适宜用量也是目前研究的热点之一。本文在江苏肥料投入量较大的环太湖地区,通过田间试验,研究不同沼液施用量下水稻产量、氮素利用率、稻田田面水无机氮浓度、土壤残留无机氮含量以及稻田氨挥发等环境效应,为探索稻田合理消纳沼液提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验位于江苏省宜兴市丁蜀镇莲花荡农场(119°52'E,31°15'N),毗邻太湖。该区属亚热带季风气候区,多年平均气温在15~17℃,年平均降雨量1100 mm。供试土壤为水稻土,整体肥力较高,农作制为稻麦轮作。供试沼液来自周边猪场沼气工程。土壤和沼液的基本理化性质见表1和表2。

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 The basic chemical properties of the experimental soil

pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
6.30	32.5	2.27	170.2	7.52	111.1

表2 供试沼液的基本理化性质

Table 2 The basic chemical properties of the biogas slurry

pH	电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	总氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	铵态氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	硝态氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总钾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
8.01	5.93	520	389	3.85	12.0	218

1.2 试验设计与田间管理

试验设6个不同沼液用量处理以及1个化肥处理,每个处理设4次重复,随机区组排列。试验小区面积 30 m^2 ($6\text{ m}\times 5\text{ m}$),小区四周做埂,并用地膜覆盖相隔用于防止相邻小区间田面水的串水,四周设置保护行。以当地推荐化肥施肥量(氮素 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)作为沼液氮素100%优化用量。处理①为不施肥处理(CK),处理②为沼液氮素优化用量的40%(ZY40%),处理③为沼液氮素优化用量的70%(ZY70%),处理④为沼液氮素优化用量的100%(ZY100%),处理⑤为沼液氮素优化用量的130%(ZY130%),处理⑥为沼液氮素优化用量的250%(ZY250%),处理⑦为化肥处理(HF100%),其氮素投入与沼液氮素优化用量100%的氮投入相同。试验中沼液和化肥氮按常规水稻氮肥施用时期分3次施用(苗期、分蘖末期和穗期分别占总量的40%、26.7%和33.3%),各处理磷、钾肥作为底肥一次性施用,折合 P_2O_5 、 K_2O $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮、磷、钾化肥分别用市售尿素、过磷酸钙及氯化钾。供试水稻品种为南粳46,于2015年6月15日移栽,11月4日收获,生产期142 d。各小区其他田间管理措施均保持一致。

1.3 测定项目及方法

在每次沼液或肥料施用后,连续10 d采集田面水(不扰动水层,随机选取3处,混合水样),测定其铵态氮和硝态氮浓度(AA3流动分析仪分析法)。氨挥发采用田间原位测定法^[13](通气法):在每次施肥后连续10 d采集吸附氨海绵块,用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液提取铵态氮后测定氨挥发量并计算单位面积的氨挥发量。在水稻收获期采集植株及土壤(0~15 cm),测水稻地上部氮素吸收量与土壤无机氮(KCl浸提-AA3流动分析仪分析法)。水稻收获时每小区取 2 m^2 脱谷实测产量。

1.4 计算公式和数据处理

根据氮素利用率评价原理和方法,本文中:氮素利用率=(施肥处理地上部吸氮量-不施肥处理地上部吸氮量)/施氮量 \times 100%;氮素农学利用率=(施肥处理稻谷产量-不施肥处理稻谷产量)/施氮量,氨挥发氮素损失=(施肥处理氨挥发累积量-不施肥处理氨挥发累积量)/施氮量 \times 100%,土壤无机氮残留=(土壤铵态氮含量+土壤硝态氮含量) \times 土壤容重 \times 土层深度/10。

本文采用 Excel 2013 软件进行数据统计处理,采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析和多重比较(LSD 检验),处理间差异显著性水平定为 $P<0.05$ 。采用线性加平台模型拟合水稻种植中沼液氮素效应。

2 结果与分析

2.1 沼液施用量对水稻产量和土壤残留无机氮的影响

如图 1 所示,水稻产量随着沼液施用量的增加先增加后基本保持不变,ZY100%处理水稻产量最高,为 $10.00 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比 CK 处理显著提高 25.2%;当沼液氮素施用量大于 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻产量呈现平台反应,即随着沼液氮素施用量的增加水稻产量基本保持不变。水稻产量随沼液施用量的变化符合线性加平台模型,将沼液施用量与水稻产量运用线性加平台模型拟合(图 1),由方程计算得出,沼液氮素最佳施用量为 $213.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,对应水稻产量为 $9.90 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。当沼液氮素施用量低于 $213.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,水稻产量与沼液氮素施用量呈现极显著的正相关关系,每千克沼液氮可增加水稻产量 9.05 kg 。从图 1 还可以看出,土壤残留无机氮含量随沼液氮素施用量的增加持续增加,比 CK 处理提高 17.40%~52.46%。

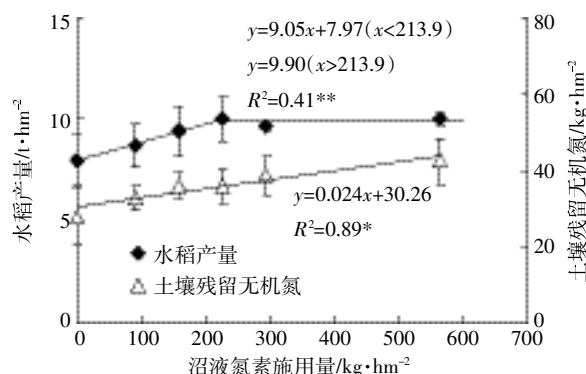


图 1 不同沼液氮素施用量下水稻产量与土壤残留无机氮含量

Figure 1 Rice yield and the soil residual N_{min} after harvest of the different biogas slurry application rate

2.2 沼液施用量对水稻氮素利用率的影响

水稻地上部氮素吸收量和氮素利用率的结果见表 3。水稻地上部氮素吸收量随着施氮量的增加而增加,ZY250%处理水稻地上部氮素吸收量最高,为 $202.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与 CK 处理相比显著增加 45.89%。水稻氮素利用率随着沼液氮素施用量增加呈现先上升后下降的趋势,在 $90\sim 225 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内水稻氮素利用率增加,在 $225\sim 562.5 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内水稻氮素利用率呈现下降趋势。等氮量的沼液和化肥处理(ZY100%与 HF100%)处理间水稻氮素利用率无显著差异。

从氮素农学利用率变化来看,ZY250%处理最低,与 ZY40%、ZY70%和 ZY100%处理相比,其氮素农学利用率显著降低 56.85%~60.13%,而 ZY100%与 HF100%处理间无显著差异。

2.3 沼液施用量对稻田田面水无机氮浓度的影响

由图 2 可知,田面水铵态氮浓度随沼液施用量的增加而显著增加。本试验在 6 月 24 日、8 月 5 日和 8

表 3 不同沼液用量下水稻氮素吸收量及氮素利用率

Table 3 The rice nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of the different treatments

处理	施氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	水稻地上部吸氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	氮素利用率/%	氮素农学利用率/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	0	$138.6\pm 25.58\text{c}$		
ZY40%	90.0	$150.3\pm 30.69\text{bc}$	$13.00\pm 4.35\text{b}$	$8.39\pm 2.01\text{a}$
ZY70%	157.5	$166.4\pm 34.30\text{abc}$	$17.61\pm 5.06\text{b}$	$9.08\pm 3.42\text{a}$
ZY100%	225.0	$196.1\pm 26.18\text{ab}$	$25.53\pm 1.04\text{a}$	$8.73\pm 2.82\text{a}$
ZY130%	292.5	$187.3\pm 7.25\text{ab}$	$16.65\pm 2.48\text{b}$	$5.70\pm 0.60\text{ab}$
ZY250%	562.5	$202.2\pm 29.81\text{a}$	$11.30\pm 2.42\text{b}$	$3.62\pm 0.51\text{b}$
HF100%	225.0	$202.7\pm 14.88\text{a}$	$28.48\pm 6.62\text{a}$	$6.88\pm 2.10\text{ab}$

注:表中数据为平均值 \pm 标准差;同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data is Mean \pm SD; Different letters in a row indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same below.

月22日分三次追施沼液和化肥,3次追施沼液后3d内田面水铵态氮浓度的平均值依次为22.32~57.38、10.17~38.38、7.05~21.30 mg·L⁻¹,与CK相比,分别提高1.0~4.1、6.41~26.9、18.5~57.9倍。与HF100%处理相比,ZY100%处理施沼液后3d内铵态氮浓度的平均值分别提高0.27、3.76、2.29倍。3d后田面水铵态氮浓度迅速降低并趋于稳定,与CK相比无显著差异。

施用沼液和化肥对田面水硝态氮浓度无明显影响(图3)。各处理的田面水硝态氮浓度呈现先上升后下降的趋势,在沼液和化肥施用后3~6d内达到最大值,6d后逐渐下降并趋于稳定。各处理田面水硝态氮浓度均低于2.0 mg·L⁻¹,处理间无显著差异。

2.4 沼液施用量对稻田氨挥发的影响

不同沼液施用量下稻田氨挥发的动态变化见图4。稻田氨挥发速率一般在沼液追施后显著提高。氨挥发速率在第一次施用沼液后10d内均较高,在后两次追施中施入沼液后的一周内挥发速率较高,随后逐渐降低并趋于稳定。各沼液处理氨挥发的峰值分别出

现在沼液施用后的第8d、第1d和第7d,分别达到6.72~10.34、2.31~11.02、2.20~12.07 kg·hm⁻²·d⁻¹。化肥处理氨挥发的峰值分别出现在施肥后的第2d、第1d和第7d,分别达到7.63、4.63、3.81 kg·hm⁻²·d⁻¹。

氨挥发量随着沼液施用量的增加而提高,与CK相比,各沼液处理氨挥发累积量增加0.57~3.35倍,单位产量的氨挥发累积量显著增加0.67~2.84倍(表4)。与相同施氮量的化肥处理相比,ZY100%处理氨挥发累积量无明显差异,但单位产量的氨挥发量显著降低22.6%。水稻整个生育期内的氨挥发量占沼液氮素施用量的14.52%~17.64%,占化肥施氮量的19.22%,各处理间氨挥发引起的氮素损失率无显著差异。

3 讨论

本研究结果表明,水稻产量随着沼液氮素施用量的增加而增加,当施沼液氮素量超过213.9 kg·hm⁻²,水稻产量基本保持稳定,不再提高。岑汤蛟等^[14]研究表明,单季稻施用不同用量沼液能够取得不同程度的

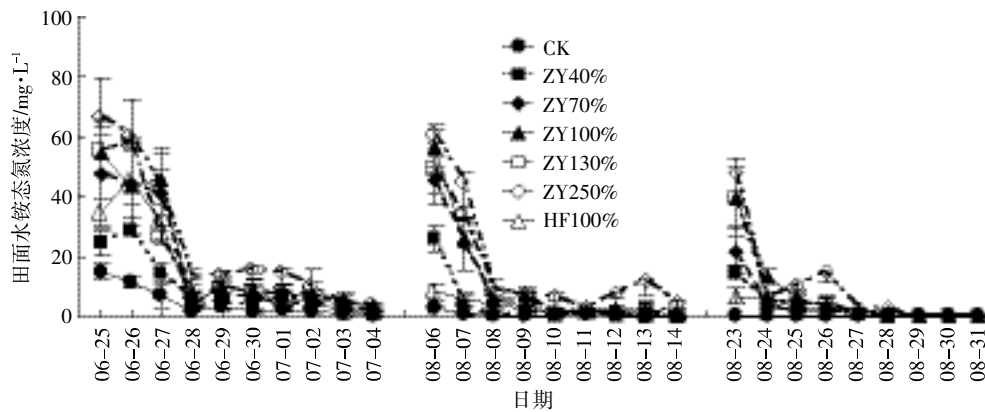


图2 不同处理间稻田田面水铵态氮动态变化

Figure 2 Dynamic of NH₄⁺-N in surface water of different treatments

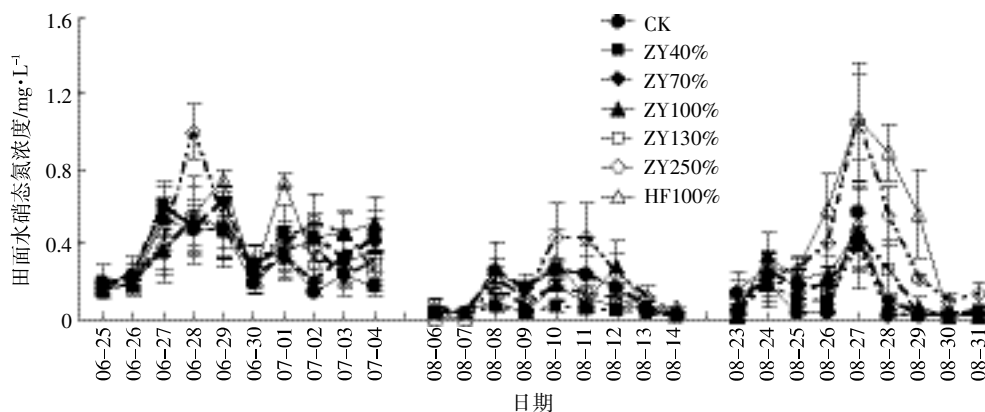


图3 不同处理间稻田田面水硝态氮动态变化

Figure 3 Dynamic of NO₃⁻-N in surface water of different treatments

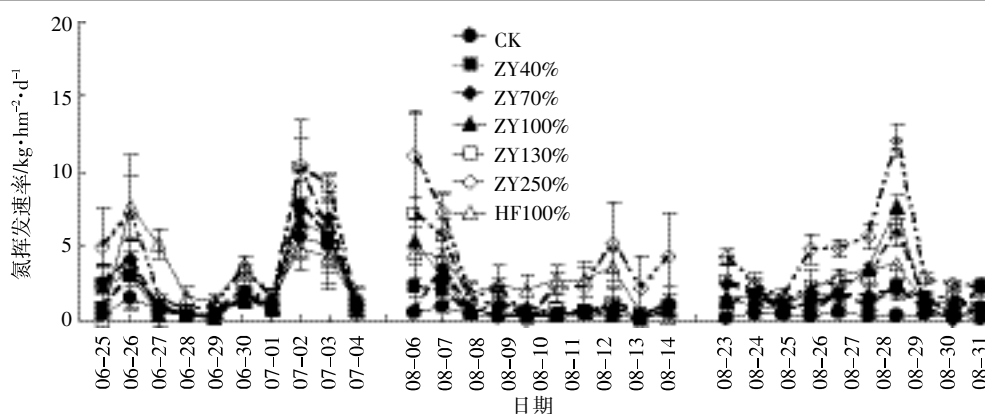


图4 不同处理间氨挥发速率的动态变化

Figure 4 The dynamic of ammonia volatilization rate of different treatments

表4 不同沼液用量对稻田氨挥发累积量及氮素损失率的影响

Table 4 Effects of different biogas slurry treatments on ammonia volatilization and nitrogen loss rate in paddy field

处理	施氮量/kg·hm ⁻²	氨挥发累积量/kg·hm ⁻²	单位产量的氨挥发量/kg·hm ⁻²	氮素损失率/%
CK	0	27.67±4.16d	3.00±0.18e	
ZY40%	90.0	43.54±4.52c	5.02±0.63d	17.64±5.02a
ZY70%	157.5	52.86±5.51c	5.65±0.54cd	16.00±3.56a
ZY100%	225.0	60.33±5.53bc	6.12±1.05cd	14.52±2.46a
ZY130%	292.5	70.29±4.83b	7.04±0.07bc	14.57±1.65a
ZY250%	562.5	120.4±13.97a	11.53±1.26a	16.48±2.48a
HF100%	225.0	70.92±10.62b	7.91±1.69b	19.22±4.72a

增产,且效果较明显。这可能是由于沼液中除含有大量的速效养分外,还含有各种氨基酸、有机酸、抗菌物质等生物活性物质,可作为能源为土壤微生物利用,激发土壤微生物的活性^[15],从而有利于水稻产量的增加。然而水稻产量的增加是在一定的施氮范围内,侯云鹏等^[16]研究也表明,施氮量在 60~180 kg·hm⁻² 范围内水稻产量随氮肥用量的增加而显著增加,当超过 180 kg·hm⁻² 时水稻产量不会继续增加。这可能是由于氮素过量,引起水稻徒长,产量不仅没有增加,反而可能有所降低。本研究中,氮素利用率呈现先升高后降低的趋势,在沼液施用量达到 225 kg N·hm⁻² 时,氮素利用率达到最高。杨绍聪等^[17]和杨梢娜等^[18]研究也表明,水稻氮素利用率有相似的变化趋势,分别在施用化肥 255 kg N·hm⁻² 和 210 kg N·hm⁻² 时达到最高。这可能是由于当地长期过量施用氮肥,导致土壤中氮素含量较高。在沼液施用量较低时水稻地上部氮素吸收量较不施肥处理无明显增加,从而呈现较低的氮素利用率;当沼液施用量过高时,供应的氮超过水稻的农学需氮量,水稻对氮素的吸收增加不显著,而且水稻产量也无明显增加,从而造成氮素利用率和氮素农

学利用率降低。因此,沼液在稻田中的适宜用量应使氮素投入量符合水稻的农学需氮量。

本研究显示,沼液施用后的 3 d 内田面水的铵态氮浓度显著增加,随后迅速降低,而沼液施用对田面水硝态氮初始浓度无明显影响,田面水硝态氮浓度呈现先上升后下降并趋于稳定的趋势。这可能是由于沼液中氮素主要以铵态氮形式存在,一般情况下沼液中铵态氮占总氮量的 70% 以上^[19],本试验所用沼液中铵态氮占总氮量的 74.8%。沼液中大量的铵态氮属于速效养分,水稻对铵态氮的吸收以及田面水下渗使得其中的铵态氮被土壤吸附,同时还伴随着氨挥发以及部分铵态氮通过硝化作用转化为硝态氮,多方面作用使得田面水中的铵态氮浓度迅速降低。田面水硝态氮浓度升高可能是沼液施灌初期较强的硝化作用所致,而后随着水稻的吸收或硝态氮的淋失作用,田面水硝态氮浓度降低。王子臣等^[20]和李喜喜等^[21]的研究也表明,田面水无机氮浓度有相似的变化趋势,本研究与大多研究结果基本一致。由于沼液施灌后的 3 d 内田面水铵态氮浓度较高,此时若产生地面径流,将推高周边水体富营养化的风险。因此,施用沼液后的 3 d 内是

控制稻田产生地表径流、降低水体富营养化风险的关键时期,施用沼液前应密切注意天气情况,避免在施用后的3 d内出现强降雨天气。本研究还显示,等氮量的沼液处理田面水铵态氮浓度显著高于化肥处理,可能与尿素的水解速率有关,尿素水解产生铵态氮需要一定的时间。因此,尿素施用后3 d内田面水铵态氮的含量显著低于沼液处理。

一般情况下,氨挥发损失占稻田氮素损失的42.2%~72.0%^[22],是氮素损失的重要途径。本研究结果表明,氨挥发量随着沼液施用量的增加而显著增加,并且主要发生在沼液施用后的7~10 d。水稻不同生育期施用沼液氨挥发峰值的出现时间不同,可能与当时的天气情况以及水稻对养分的吸收能力强弱有关。苗期施用沼液时,在施用后的3~7 d,连续阴雨,并且苗期植株根系不发达,对养分的吸收能力较弱,随着天气的好转,氨挥发速率明显加快;分蘖末期施用沼液时,正处于三伏天气,温度高,地面蒸发强烈,同时水稻对养分的吸收能力较强,因此水稻在该生育期氨挥发峰值出现时间较早;穗期施用沼液时,天气情况与苗期类似。邓欧平等^[23]研究表明,沼液施用后的前7 d是稻田氨挥发的关键时期,唐良梁等^[24]研究表明,稻田氨挥发主要发生在施肥后的7 d内。这可能是由于施用沼液显著提高了田面水的铵态氮浓度,而田面水铵态氮浓度是影响稻田氨挥发的主要因素之一^[25]。因此,如何在施肥后一周内减少氨挥发引起的氮素损失是未来研究的重要内容之一。

本试验还表明,等氮量沼液处理与化肥处理相比,水稻产量和氮素利用率均无明显差异,单位产量的氨挥发累积量显著降低。张进等^[26]研究表明,与常规施肥相比,沼液处理的稻谷产量没有显著提高,但是明显降低了水稻的生产成本。这说明稻田施用沼液在保障水稻产量平稳的前提下,还缓解了沼液带来的环境压力。但本研究显示,在2.5倍沼液氮素施用条件下,其残留的土壤无机氮和氨挥发累积量大幅增加,田面水中的无机氮也最高,而水稻产量没有显著增加,并且其氮素利用率和氮素农学利用率显著降低。这说明稻田施用沼液需要确定适宜用量,通过不同沼液施用量数据拟合得出农田合理消纳沼液的最佳施用量,以达到在保障水稻较高产量的基础上,降低其环境风险的目的。

4 结论

(1)水稻产量随着沼液施用量的变化符合线性加平台模型。根据线性加平台模型拟合得出,本试验条

件下,最佳的沼液氮素施用量是213.9 kg·hm⁻²,最佳氮素施用量下的产量达到9.90 t·hm⁻²。

(2)沼液处理显著增加了稻田田面水的铵态氮浓度,对田面水硝态氮浓度无明显影响,并显著增加了稻田氨挥发累积量。沼液施用后的1~3 d内,铵态氮浓度降幅达到56.40%~92.58%;氨挥发主要发生在沼液施用后的一周内,且引起的氮素损失占沼液氮素量的14.52%~17.64%。

参考文献:

- [1] 李淑兰,邓良伟. 2007年我国畜禽养殖废弃物处理的宏观政策及技术进展[J]. 猪业科学, 2008(1):70-72.
LI Shu-lan, DENG Liang-wei. Macro-policy and technical progress of China's livestock and poultry waste treatments in 2007[J]. *Swine Industry Science*, 2008(1):70-72
- [2] 中华人民共和国中央人民政府门户网站. 全国农村沼气建设进展迅速,用户已超过3000万户 [EB/OL].[2009-8-31]. http://www.gov.cn/jrzq/2009-08/31/content_1405461.htm
The State Council, The People's Republic of China. National rural biogas construction progress has been rapid, users more than 30 million households[EB/OL].[2009-8-31]. http://www.gov.cn/jrzq/2009-08/31/content_1405461.htm
- [3] 张无敌. 沼气发酵残余物利用基础[M]. 昆明:云南科技出版社, 2002:5-80.
ZHANG Wu-di. Biogas fermentation residue utilization[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 2002:5-80.
- [4] 王远远,刘荣厚. 沼液综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4):1089-1091.
WANG Yuan-yuan, LIU Rong-hou. Progress of comprehensive utilization of biogas slurry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(4):1089-1091.
- [5] 张亚莉,董仁杰,刘玉青. 沼肥在农业生产中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(35):11549-11550.
ZHANG Ya-li, DONG Ren-jie, LIU Yu-qing. Utilization of biogas fertilizer in the agriculture production[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(35):11549-11550.
- [6] 黄世文,廖西元. 沼肥用于水稻的现状 & 展望[J]. 中国沼气, 2005, 23(2):23-26.
HUANG Shi-wen, LIAO Xi-yuan. Progress and prospect of biogas fermentation residues(MFR) application on rice planting[J]. *China Biogas*, 2005, 23(2):23-26.
- [7] Clemens J, Trimbom M, Weiland P, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(2/3):171-177.
- [8] 薛利红,杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1):117-124.
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1):117-124.

- [9] 李松林, 吕军, 张峰, 等. 高浓度沼液淹灌水土系统中氮、磷和有机的动态变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 125-129.
LI Song-lin, LÜ Jun, ZHANG Feng, et al. Dynamic changes of nitrogen, phosphorus and organic matter in soil-water system in the process of biogas slurry flooding treatment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 125-129.
- [10] 黄继川, 徐培智, 彭智平, 等. 基于稻田土壤肥力与生物学活性沼液适宜用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 362-371.
HUANG Ji-chuan, XU Pei-zhi, PENG Zhi-ping, et al. Biogas slurry use amount for suitable soil nutrition and biodiversity in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(2): 362-371.
- [11] 唐微, 伍钧, 孙百晔, 等. 沼液不同施用量对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2268-2273.
TANG Wei, WU Jun, SUN Bai-ye, et al. Effects of application amount of biogas slurry on yield and quality of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2268-2273.
- [12] 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1328-1336.
JIANG Li-na, WANG Qiang, CHEN Ding-jiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1328-1336.
- [13] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205-209.
- [14] 岑汤校, 张硕, 胡宇峰. 单季稻不同用量沼液的肥效试验[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 83-85.
CEN Tang-xiao, ZHANG Shuo, HU Yu-feng. Efficiency of biogas slurry fertilizer in different amount on single cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2012(2): 83-85.
- [15] 冯伟, 管涛, 王晓宇, 等. 沼液与化肥配施对冬小麦根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1007-1012.
FENG Wei, GUAN Tao, WANG Xiao-yu, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on wheat rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1007-1012.
- [16] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 118-124.
HOU Yun-peng, YANG Jian, LI Qian, et al. Effects of different nitrogen application on yield, nitrogen utilization and accumulation of soil inorganic nitrogen of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 118-124.
- [17] 杨绍聪, 吕艳玲, 沐婵, 等. 抚仙湖北部农田区不同施肥对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 1-6.
YANG Shao-cong, LÜ Yan-ling, MU Chan, et al. Effects of different fertilization on yield, nitrogen absorption and its use efficiency of rice in the northern agricultural area of Fuxian Lake[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(15): 1-6.
- [18] 杨梢娜, 俞巧钢, 叶静, 等. 施氮水平对杂交晚粳“浙优12”产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1120-1125.
YANG Shao-na, YU Qiao-gang, YE Jing, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1120-1125.
- [19] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 27(1): 291-296.
JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 27(1): 291-296.
- [20] 王子臣, 梁永红, 盛婧, 等. 稻田消解沼液工程措施的水环境风险分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 213-220.
WANG Zi-chen, LIANG Yong-hong, SHENG Jing, et al. Analysis of water environment risk on biogas slurry disposal in paddy field[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 213-220.
- [21] 李喜喜, 王昌全, 杨娟, 等. 猪粪施用对水稻田面水养分动态变化特征及流失风险的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 130-136.
LI Xi-xi, WANG Chang-quan, YANG Juan, et al. Effects of pig manure application on the dynamic changes and loss risks of nutrients in surface water of paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 130-136.
- [22] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田氮素损失特征及环境效应分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1149-1154.
ZHAO Dong, YAN Ting-mei, QIAO Jun, et al. Characteristics of N loss and environmental effect of paddy field in Taihu area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1149-1154.
- [23] 邓欧平, 姜丽娜, 陈丁江, 等. 大量沼液施灌稻田氨挥发特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 233-236.
DENG Ou-ping, JIANG Li-na, CHEN Ding-jiang, et al. Ammonia volatilization from the biogas slurry irrigation paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 233-236.
- [24] 唐良梁, 李艳, 李恋卿, 等. 不同施氮量到稻田氨挥发的影响及阈值研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1232-1239.
TANG Liang-liang, LI Yan, LI Lian-qing, et al. Effects of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1232-1239.
- [25] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893-900.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 893-900.
- [26] 张进, 张妙仙, 单胜道, 等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2005-2009.
ZHANG Jin, ZHANG Miao-xian, SHAN Sheng-dao, et al. Growth status grain yield and heavy metals content of rice as affected by biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2005-2009.