

周 炜, 孙国峰, 王 鑫, 等. 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1743–1750.

ZHOU Wei, SUN Guo-feng, WANG Xin, et al. Risk of nitrogen loss under the combined application of biogas slurry and organic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1743–1750.

沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究

周 炜, 孙国峰, 王 鑫, 童红玉, 盛 婧*

(农业农村部种养结合重点实验室/江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘 要:本研究旨在探索沼液、有机肥配施等氮量替代化肥的模式,期望能够在保持产量稳定的前提下,降低稻田氮素损失的风险。本试验以太湖水稻土为研究对象进行盆栽试验,设置了空白对照(CK)、常规化肥(NPK)、100%沼液、75%沼液+25%猪粪有机肥、50%沼液+50%猪粪有机肥和100%猪粪有机肥六个处理,采用密闭室间歇通气法研究了不同生育时期的稻田氨挥发特性,同期测定稻田田面水氮含量,以及全施肥期径流流失量。试验结果显示,在等施氮量条件下,常规化肥处理水稻产量达 $12\ 752.70\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其农田氨挥发总量为 $76.99\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,径流氮损失量 $39.11\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;100%沼液施用处理和75%沼液+25%猪粪有机肥配施处理氨挥发量较高,分别为 120.66 、 $88.01\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;而50%沼液+50%猪粪有机肥配施处理氨挥发总量和径流氮流失量均低于常规化肥处理,分别为 58.03 、 $22.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其产量与常规化肥处理相比无显著性差异;100%猪粪有机肥施用处理尽管氨挥发总量和径流氮流失量表现最低,但其产量低于50%沼液+50%猪粪有机肥配施处理。综合比较而言,50%沼液+50%猪粪有机肥配合施用处理在保持一定产量的基础上又能减少氨挥发及氮流失风险,是一种比较适宜的施肥模式。

关键词:沼液;有机肥;氮损失;稻田;氨挥发;径流流失

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)08-1743-08 doi:10.11654/jaes.2018-1614

Risk of nitrogen loss under the combined application of biogas slurry and organic fertilizer

ZHOU Wei, SUN Guo-feng, WANG Xin, TONG Hong-yu, SHENG Jing*

(Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Recycling Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The purpose of this study is to explore a model for the combined application of biogas slurry and organic fertilizer instead of chemical nitrogen fertilizer to reduce the risk of nitrogen loss in a paddy field while maintaining a stable yield. A pot experiment was conducted to investigate the characteristics of ammonia volatilization, nitrogen content in surface water, and nitrogen loss in runoff after fertilization during rice growth. The soil from a paddy field in Taihu Lake was used in the experiment. There were six treatments, including a blank control, conventional chemical fertilizer, 100% biogas slurry, 75% biogas slurry + 25% pig manure organic fertilizer, 50% biogas slurry + 50% pig manure organic fertilizer, and 100% pig manure organic fertilizer. The results showed that under the same nitrogen application rate, rice yield in the conventional chemical fertilizer treatment reached $12\ 752.70\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the total amount of ammonia volatilization and nitrogen loss in runoff was $76.99\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $39.11\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Compared with the conventional chemical fertilizer treatment, the ammonia volatilization was significantly higher in both 100% biogas slurry treatment and 75% biogas slurry + 25% pig manure organic fertilizer treatments, with $120.66\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $88.01\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The total amount of ammonia volatilization ($58.03\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and runoff nitrogen loss ($22.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) in the 50% biogas slurry + 50% pig manure organic fertilizer treatment was significantly lower than that in the conventional chemical fertilizer treatment; however, the rice yield did not differ significantly. The amount of ammonia volatilization and runoff nitrogen loss in 100% pig manure organic fertilizer treatment was the lowest among all treatments; however, the

收稿日期:2018-12-21 录用日期:2019-03-15

作者简介:周 炜(1982—),男,江苏无锡人,助理研究员,主要从事农业生态与资源环境方面研究。E-mail:zwei@jaas.ac.cn

*通信作者:盛 婧 E-mail:nkysj@hotmail.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800105);江苏省自主创新资金[CX(16)1003]

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFD0800105); Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund(JASTIF) [CX(16)1003]

rice yield was lower than that of the 50% biogas slurry + 50% pig manure organic fertilizer treatment. Therefore, 50% biogas slurry + 50% pig manure organic fertilizer is a more appropriate fertilization model, which can reduce the risk of ammonia volatilization and runoff nitrogen loss while maintaining a certain yield.

Keywords: biogas slurry; organic fertilizer; nitrogen loss; paddy field; ammonia volatilization; runoff loss

水稻是中国主要的粮食作物之一,也是江苏省两大主粮种植作物之一,养分需求量大。近年来我国畜禽养殖业及农村沼气工程迅猛发展^[1-2],沼液、有机肥作为主要的废弃物处理产物产生量巨大,处理困难,对生态环境及人居健康带来很大的压力^[3-5],且沼液作为液体,在储存、运输、使用以及肥料商品化等方面较有机肥难度更大,相关养殖企业迫切需要有好的消纳方法。另一方面,沼液、有机肥富含多种作物生长必需的养分及活性物质,沼液还能补充灌溉水^[6-7],因此,利用水稻田消纳沼液、有机肥,既合理有效地利用了废弃物,又解决了胁迫环境的问题,有机肥和沼液配合农田施用成为重要利用方向。国内外目前相关研究主要集中在沼液、有机肥对作物产量、品质影响及沼液、有机肥农田适宜消纳量研究等等^[7-8],如黄红英等^[9]以沼液部分替代化肥进行试验,发现小麦和水稻产量较常规化肥处理有一定的增幅;陶磊等^[10]用有机肥部分替代化肥,结果显示不仅不会造成棉花减产,且对提高土壤酶活性、调节土壤细菌、真菌、放线菌群落组成结构,改善北疆绿洲滴灌棉田土壤生物学性状有显著作用;Cassman等^[11]认为有机无机肥配合施用能明显提高氮肥利用率。前人研究多以沼液/有机肥与无机化肥配施为对象,而对以多种有机肥料配合施用全量替代无机化肥为目标研究其对环境的影响涉及不多,本研究以太湖水稻土为目标对象进行盆栽试验,研究4种不同配比的沼液与猪粪有机肥处理条件下氨挥发、田面水氮浓度、径流氮损失量,综合分析沼液与猪粪有机肥配施处理对氮损失以及产量的影响,以期能为有机肥农田合理消纳利用及其环境影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于2017年在江苏省农业科学院本部内进行,位于江苏省南京市玄武区。该区属北亚热带湿润气候,常年平均降雨117 d,平均降雨量1 106.5 mm,相对湿度76%,无霜期237 d,年平均温度15.4℃。

1.2 试验材料

试验用土壤类型为太湖水稻土,取回后放置风

干,碾磨过筛去石块。试验前土壤基本理化性质为pH 6.38,有机质 $18.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $1.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷含量 $1.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $203 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。盆栽试验所用容器为有机玻璃圆桶,高60 cm,直径30 cm。桶外侧包覆隔热层,并裹以铝箔防晒。将过筛好的土壤分两层放入桶中按容重压实:下层高30 cm,容重 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;上层高18 cm,容重 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

试验用沼液来自江苏泰兴洋宇公司养猪场沼气工程,常年运行,其养分含量为总氮 $1.66 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷 $0.128 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,钾 $1.013 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;试验用猪粪有机肥来自江苏省农业科学院六合基地有机肥厂,其养分含量为全氮1.18%,全磷1.89%,速效钾1.04%,含水量18.91%。供试水稻品种为南粳9108,属迟熟中粳品种,于6月27日移栽于圆桶中,基肥期为6月28日—7月4日,蘖肥期为7月8日—7月14日,穗肥期为8月11日—8月17日,10月30日收获,全生育期合计156 d。

1.3 试验设计

试验设计6个处理,分别为:CK、NPK、100%沼液(100%沼)、75%沼液+25%猪粪有机肥(75%沼+25%猪)、50%沼液+50%猪粪有机肥(50%沼+50%猪),和100%猪粪有机肥(100%猪),每个处理3次重复。以 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} \text{ N}$ 为基准等氮量替代,各处理基肥:蘖肥:穗肥施用比例为5:1:4,N:P:K施用比例为1:0.5:0.5。沼液、有机肥配施处理中猪粪有机肥作基肥,用化肥补齐不足施用比例处理的磷钾肥用量,补足的磷钾肥全部基施,部分处理磷钾肥过量。各处理肥料施用方法见表1,其中沼液为液体,施用时间控制在施肥当天给水稻盆钵补充灌溉水之前,施入沼液后即开始给各盆钵浇水至田面水层高度一致。在每次施肥后第1~7 d开始原位测定氨挥发通量,并采集田面水样品带回实验室,测定总氮含量。降雨时收集径流,测量径流产生量,并测定其氮含量。水稻成熟时测定各处理产量。

1.4 测定方法

氨挥发测定采用密闭室间歇通气法^[12],每日上午9:00—11:00和下午3:00—5:00测定,以这4 h的通量值作为每日氨挥发的平均通量计算该日氨挥发总量。密闭室为直径11 cm(内径10 cm)、高15 cm,底

部开放的有机玻璃圆筒,顶部留有一通气孔(直径25 mm)与2.5 m高的通气管连通,将通气管架到离地面约3 m高处,保证交换空气氨浓度一致。将密闭室嵌入表土中,上面留有约3~5 cm高的密闭室空间。在洗气瓶中装氨吸收溶液用于吸收NH₃,流动分析仪测定。田面水氮含量采用流动分析仪测定,每次施肥后1 d取样,然后每隔2 d取样1次,持续8~10 d;径流氮损失采用流动分析仪测定,盆栽所用有机玻璃圆筒上部有一开口,位于土层上方10 cm处,用塑管下接储液容器,每次降雨产生径流,即自开口流出至储液容器中,及时采集并处理。水稻收获后人工统计各处理总穗数、每穗粒数及千粒重等数据计算产量。

1.5 数据处理

用Excel软件处理数据,采用SPSS 19.0对数据进行统计分析,用LSD法比较各处理之间的差异($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水稻产量构成

从表2可以看出,各试验处理的产量数据,配施处理整体表现为与施用沼液比例呈正相关。其中常规NPK处理产量为12 752.70 kg·hm⁻²,而配施处理的产量分别为100%沼液12 934.65 kg·hm⁻²,75%沼

液+25%猪粪有机肥11 691.60 kg·hm⁻²,50%沼液+50%猪粪有机肥11 205.90 kg·hm⁻²,100%猪粪有机肥10 876.95 kg·hm⁻²,但方差分析显示这4个处理与常规NPK处理间无显著性差异,与施入肥料氮损失未呈明显关系。测定各试验处理的秸秆氮含量,方差分析显示也无显著性差异。

2.2 稻田氨挥发

从图1可以看出,3个施肥期氨挥发速率峰值大致表现为基肥期>穗肥期>蘖肥期,各时期最高挥发速率分别为基肥期20.75 kg·hm⁻²·d⁻¹,蘖肥期9.38 kg·hm⁻²·d⁻¹,穗肥期15.79 kg·hm⁻²·d⁻¹。具体分时期来看,基肥期各处理氨挥发趋势有明显差异:常规NPK处理呈先升后降,在第3 d达到氨挥发峰值后缓慢下降;100%猪粪有机肥处理与50%沼液+50%猪粪有机肥处理趋势与常规NPK处理类似,但峰值较NPK处理低;而75%沼液+25%猪粪有机肥处理与100%沼液处理氨挥发峰值出现在基肥施用后第1 d,之后呈明显下降,而7月2日由于暴雨所有处理氨挥发速率均表现较低。处理间氨挥发速率出现差异的主要原因在于沼液和猪粪有机肥氮素特征不同,沼液氮以速效氮为主,而猪粪有机肥氮则以缓效的有机氮为主。蘖肥期常规NPK处理氨挥发峰值在第2 d出现,而后缓慢下降;其余处理氨挥发峰值均出现在第1 d,

表1 不同处理施肥类型和施肥量

Table 1 Type and amount of fertilization in the different treatments

处理 Treatments	基肥 Basal fertilizer	蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Ear bearing fertilizer
CK	0	0	0
NPK	化肥氮 150 kg·hm ⁻²	化肥氮 30 kg·hm ⁻²	化肥氮 120 kg·hm ⁻²
100%沼液	沼液氮 150 kg·hm ⁻²	沼液氮 30 kg·hm ⁻²	沼液氮 120 kg·hm ⁻²
75%沼液+25%猪粪有机肥	沼液氮 75 kg·hm ⁻² ,猪粪氮 75 kg·hm ⁻²	沼液氮 30 kg·hm ⁻²	沼液氮 120 kg·hm ⁻²
50%沼液+50%猪粪有机肥	猪粪氮 150 kg·hm ⁻²	沼液氮 30 kg·hm ⁻²	沼液氮 120 kg·hm ⁻²
100%猪粪有机肥	猪粪氮 150 kg·hm ⁻²	猪粪氮 30 kg·hm ⁻²	猪粪氮 120 kg·hm ⁻²

表2 肥料氮损失与水稻产量

Table 2 Total amount of nitrogen loss and the yield of rice in the different treatments

处理 Treatments	氨挥发损失率 NH ₃ loss rate/%	径流流失率 N loss rate by surface runoff/%	秸秆氮含量 Total N content of straw/%	产量 Yield		植株干物质量 DM/kg·hm ⁻²
				g·pot ⁻¹	kg·hm ⁻²	
CK			7.70a	60.87	8 610.75b	9 525.30
NPK	25.66	12.67	7.51a	90.14	12 752.70a	11 718.00
100%沼液	40.22	11.14	7.45a	91.43	12 934.65a	12 844.20
75%沼液+25%猪粪有机肥	29.34	6.81	7.66a	82.64	11 691.60a	12 661.65
50%沼液+50%猪粪有机肥	19.34	6.97	7.61a	79.21	11 205.90ab	11 667.15
100%猪粪有机肥	5.92	3.62	8.21a	76.88	10 876.95ab	11 473.35

注:同列不同小写字母分别表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

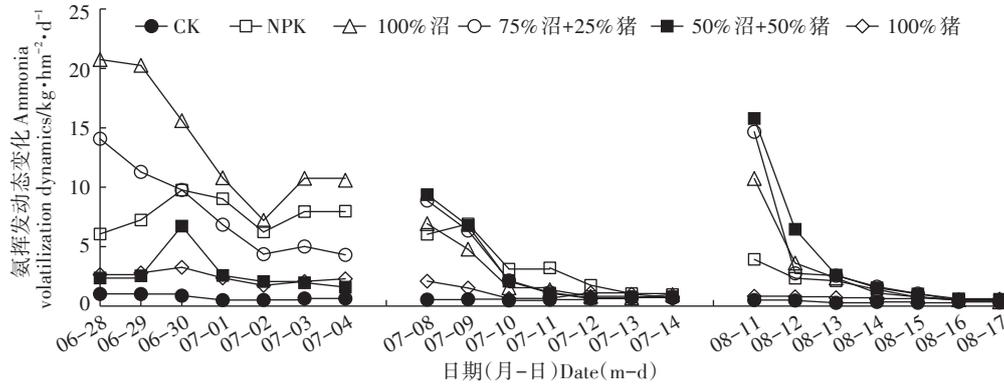


图1 氨挥发变化趋势

Figure 1 Patterns of ammonia volatilization in the different treatments

之后呈迅速下降趋势,3 d后趋于平缓。穗肥期各处理趋势类似于蘖肥期,但起点浓度更高,下降幅度更剧烈,而NPK处理也不再呈先升后降趋势,应是作物吸收养分能力增强所致。

从处理来看,整个水稻生育期3次施肥氨挥发量最高的均为当期施用纯沼液的处理,可见施用沼液会增加稻田氨挥发;而各施肥时期的纯猪粪有机肥处理氨挥发小于同期NPK处理,则表明施用猪粪有机肥可减少稻田氨挥发。值得一提的是,尽管75%沼液+25%猪粪有机肥处理和50%沼液+50%猪粪有机肥处理在分蘖肥和穗肥期的沼液施用量与100%沼液处理相同,但其氨挥发量却均高于100%沼液处理,具体原因有待于进一步研究。

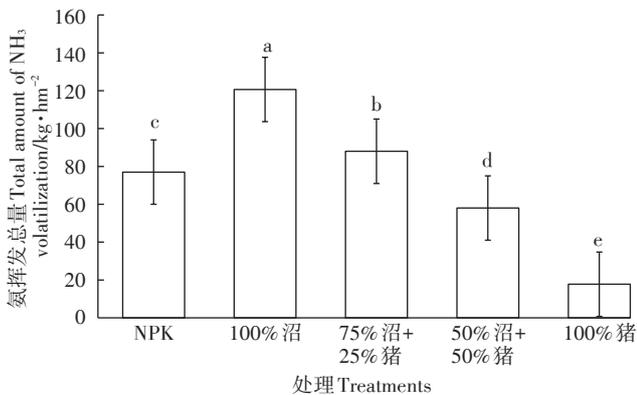
从图2及表3可以看出,不同处理全试验期施入肥料氮的氨挥发总量差异显著,表现为100%沼液>75%沼液+25%猪粪有机肥>常规NPK>50%沼液+

50%猪粪有机肥>100%猪粪有机肥。100%沼液处理和75%沼液+25%猪粪有机肥处理氨挥发总量分别为120.66 kg·hm⁻²和88.01 kg·hm⁻²,比常规NPK处理增加56.72%和14.31%,占其施入肥料氮的40.22%和29.34%;50%沼液+50%猪粪有机肥处理与常规NPK处理相比,前者氨挥发总量是后者的75.37%,差异显著;100%猪粪有机肥处理值则显著低于常规NPK处理,仅为其的23.07%(17.76 kg·hm⁻²),占其施入肥料氮的5.92%。

表3 肥料氮的氨挥发损失率

Table 3 The loss rates of ammonia volatilization in different treatments

处理 Treatments	氨挥发损失率 The loss rates of NH ₃ /%
CK	
NPK	25.66
100% 沼液	40.22
75% 沼液+25% 猪粪有机肥	29.34
50% 沼液+50% 猪粪有机肥	19.34
100% 猪粪有机肥	5.92



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at P<0.05 level

图2 肥料氮的氨挥发总量

Figure 2 Total amount of ammonia volatilization in different treatments

2.3 田面水氮含量

稻田田面水氮含量高低代表氮流失风险。从图3可以看出,整体来说,水稻全生育期所有处理3个施肥期田面水氮含量峰值,都出现于施肥后第1 d,田面水氮含量表现为穗肥期>基肥期>蘖肥期。

分时期来看,基肥期田面水氮含量变化基本呈缓慢下降趋势;从数值来看,以常规NPK处理最高,从基肥期起始的峰值125.00 mg·L⁻¹到基肥期结束的14.00 mg·L⁻¹,始终显著高于其他处理。100%沼液处理数值仅次于NPK处理。75%沼液+25%猪粪有机肥处理在基肥期是既施了猪粪有机肥,也施入了等量的沼液,故表现为起点峰值浓度略高,下降趋势平

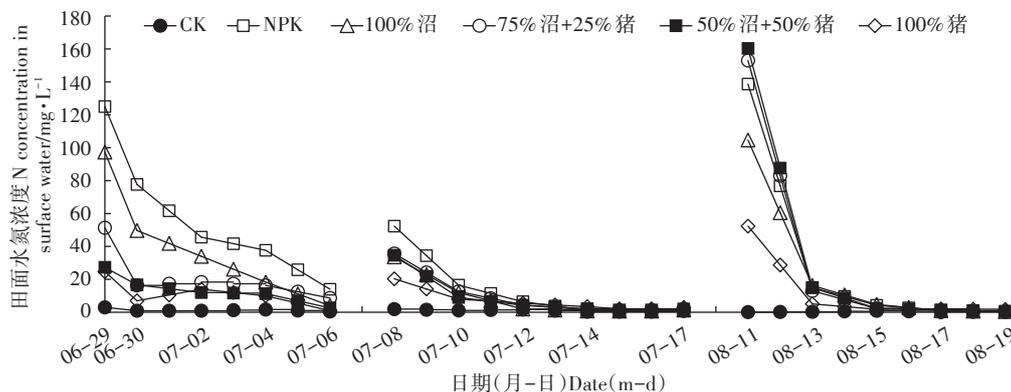


图3 田面水氮含量变化

Figure 3 Patterns of nitrogen contents in surface water in different treatments

缓。100%猪粪有机肥与50%沼液+50%猪粪有机肥处理在基肥期都是施等量的猪粪有机肥作基肥,故趋势极类似,起点峰值较低,下降曲线相对平缓。蘖肥期3个施等量沼液的处理100%沼液、75%沼液+25%猪粪有机肥处理和50%沼液+50%猪粪有机肥处理田面水氮含量水平几乎一致。穗肥期各施肥处理呈迅速下降趋势,2 d内浓度下降了约90%,4 d内下降了96%~98.5%。与常规NPK处理相比,75%沼液+25%猪粪有机肥和50%沼液+50%猪粪有机肥两个处理穗肥施用后1 d田面水氮浓度较高,分别为 $153.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $160.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而100%沼液处理虽然穗肥期施用沼液量与前述两处理相等,但氮含量却较其分别低了 $48.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $55.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与氨挥发测定结果基本一致。100%猪粪有机肥处理施肥后1 d浓度为 $52.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相比其他施肥处理最低。

综上所述,氮流失风险最高的处理是常规NPK,其次是100%沼液,而100%猪粪有机肥处理氮流失风险较低。

2.4 稻田径流氮流失

试验期间因降水共产生3次径流,分别发生于7月2日、7月10日和8月12日。从图4中可以看出,在径流氮流失总量这一指标上,常规NPK处理所产生的3次径流流失量都较高,径流流失总和高达 $39.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与之相比,沼液和有机肥处理流失总量均低于常规NPK处理,100%沼液、75%沼液+25%猪粪有机肥、50%沼液+50%猪粪有机肥和100%猪粪有机肥处理流失总量分别为 34.51 、 21.53 、 22.00 、 $11.96 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别为常规NPK处理的88.24%、55.04%、56.25%和30.57%。就施肥期而言,各配施处理在基肥期流失量占总流失量的比例较常规NPK处理流失量低,为23.61%~44.50%,而常规NPK处理为

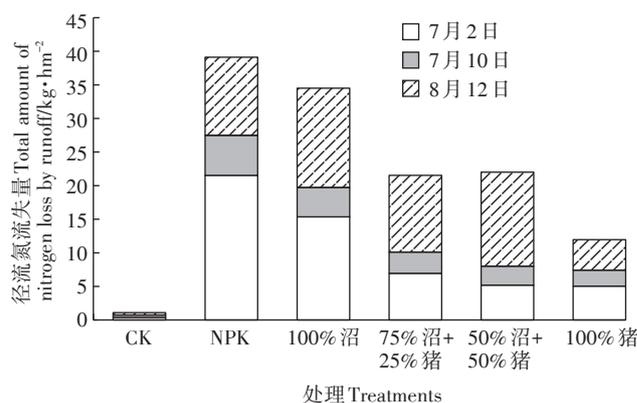


图4 径流氮流失总量

Figure 4 Total amount of runoff nitrogen loss in different treatments

55.07%;穗肥期流失量占总流失量的比例较常规NPK处理流失量高,为37.95%~63.57%,而常规NPK处理为29.74%。

表4为施入肥料氮的径流流失率数据,各处理流失率由高到低依次为常规NPK>100%沼液>50%沼液+50%猪粪有机肥>75%沼液+25%猪粪有机肥>100%猪粪有机肥,可看出各施肥期的流失率数据与施用肥料配比有较大相关性,其中沼液和猪粪有机肥的施用处理则进一步验证了沼液流失风险高而猪粪有机肥风险低;另一方面,常规化肥处理与100%沼液处理其氮流失损耗在总量上处于同一水平,但具体到分时期流失则两者在基肥期与穗肥期有明显的流失比例差异。

3 讨论

氨挥发、氮径流流失及氮淋洗等是氮素损失的几个主要途径,据相关研究显示,太湖流域水网地区水稻田的氮淋洗作用较弱^[13-14],氮素损失途径以氨挥发

表4 各处理施肥期氮流失量

Table 4 Total amount of nitrogen loss in the different treatments

处理 Treatments	基肥期 Basal dressing		蘖肥期 Tillering-top dressing		穗肥期 Ear bearing-top dressing		氮流失总量 Total amount of N loss/ kg·hm ⁻²	肥料氮的径流氮 流失总量 Total N loss amount of fertilizer by runoff/ kg·hm ⁻²	径流氮流失率 Loss rate of fertilizer by runoff/%
	流失量/ kg·hm ⁻²	流失率/ %	流失量/ kg·hm ⁻²	流失率/ %	流失量/ kg·hm ⁻²	流失率/ %			
CK	0.39d	35.63	0.35d	31.76	0.36b	32.62	1.09d		—
NPK	21.54a	55.07	5.94a	15.19	11.63a	29.74	39.11a	38.02	12.67
100% 沼液	15.36b	44.50	4.35ab	12.62	14.80a	42.88	34.51a	33.42	11.14
75% 沼液+25% 猪粪有机肥	6.95c	32.28	3.16bc	14.70	11.41a	53.02	21.53b	20.44	6.81
50% 沼液+50% 猪粪有机肥	5.19c	23.61	2.82c	12.82	13.99a	63.57	22.00b	20.91	6.97
100% 猪粪有机肥	5.04c	42.18	2.38c	19.87	4.54b	37.95	11.96c	10.87	3.62

和氮径流流失为主。本试验研究了水稻田中配施肥料的氮挥发损失,各施肥处理通过氮挥发损失的氮占总施氮量的比率分别为常规 NPK 25.66%, 100% 沼液 40.22%, 75% 沼液+25% 猪粪有机肥 29.34%, 50% 沼液+50% 猪粪有机肥 19.34% 以及 100% 猪粪有机肥 5.92%, 对比可见沼液通过氮挥发损失的氮大于常规化肥, 而猪粪有机肥氮挥发氮损失率较前两者低; 本研究揭示了在沼液与猪粪有机肥配施全量替代化肥条件下, 环境氮挥发有增、减两种表现, 其与配施肥中沼液量占比相关, 沼液施用多相应的氮挥发也多, 而施用猪粪有机肥能够降低氮挥发损失; 得出了适当比例的沼液、有机肥配施肥料可降低稻田氮挥发的结论, 这与他人研究结果趋势相似, 如邓欧平等^[15]、姜丽娜等^[16]都认为等量沼液替代化肥将增加氮挥发, 孙雅杰等^[17]认为有机肥施用对氮挥发是有抑制作用的^[18-19], 张惠等^[20]认为猪粪有机肥与化肥配施其氮挥发总量显著低于施用等氮量化肥。但邓欧平等^[15]通过试验, 得出等氮量沼液施灌处理的累计氮挥发总量为 51.00±4.46 kg·hm⁻², 全生育期氮素损失率 14.90%±1.65% 的结果, 姜丽娜等^[16]的研究也认为水稻生育期氮挥发达到 32~70 kg·hm⁻², 水稻田氮挥发损失约占沼液施入氮量的 13%, 杨润等^[21]也发现, 氮挥发所引起的氮素损失占沼液氮素量的 14.52%~17.64%, 这与本研究数据有一定出入, 作者认为, 因为氮挥发速率本身是一个关于水、肥、温度及风速等多个因素互相影响决定的函数, 在不同的研究中基于所处空间、时间等区别必然有挥发强度的差异, 区别较大则强度高低显著, 如常规水稻田有蓄水层, 小麦或果树、蔬菜等田是旱地, 两者比较则水层的有无会显著影响氮挥发速率大小; 再如同种作物, 施肥量或者施肥期、温湿度等等不同亦对结果有极大影响, 如田玉华等^[22]连续两

年研究了同一地块相同处理下的同一作物的氮挥发, 发现年度间数值有显著不同; 再加上其他因素如盆栽之于大田、沼液含氮量等不一而足, 故认为本研究氮挥发损失率高是在一个比较适合的环境下各种因素互相作用导致的结果。朱兆良^[13]研究表明, 在有利于氮挥发的条件下, 氮挥发损失率可高达施氮质量的 40%~50%, 成为氮肥损失的主要途径, 赵冬等^[23]研究表明在一般情况下, 氮挥发损失占稻田氮素损失的 42.2%~72.0%, 李艳等^[24]亦认为, 当施氮量超过 303.6 kg·hm⁻² 时, 在施肥后第 1 d, 氮挥发速率迅速上升至 20 kg·hm⁻²·d⁻¹ 左右, 这些观点与本研究结果吻合。另一方面, 氮挥发损失率沼液高于常规化肥的原因, 应该是沼液本身氮素养分组成中氨氮占 70% 以上, 其田面水中的氨比常规化肥更易逸失到空气中; 而对猪粪有机肥来讲, 其自身肥效释放缓慢, 无法与速效的沼液、化肥相比, 所以氮挥发最低。从本研究中还可以发现, 对于不同处理组而言, 施肥后的一周内都是控制氮挥发损失的重要时期, 且基肥期是氮挥发损失的关键时期, 目前有研究针对该点提出一些解决措施, 如施肥期控制田面水量, 营造不利于氮素氮挥发的环境等。

在本研究中, 不同处理通过氮流失损失的氮占总施氮量的比率分别为: 常规 NPK 13.04%, 100% 沼液 11.50%, 75% 沼液+25% 猪粪有机肥 7.18%, 50% 沼液+50% 猪粪有机肥 7.33% 以及 100% 猪粪有机肥 3.99%, 可见沼液与猪粪有机肥配施有利于减少农田氮流失损失, 且配施处理中沼液越多, 氮径流流失率越高, 但各有机肥处理流失率均低于常规 NPK 处理。因此, 沼液与猪粪有机肥配施全量替代化肥能够减少径流氮损失, 其减排效果与配施肥中猪粪占比相关。这与其他研究成果一致, 如张玉平等^[25]以湖南地区的

玉米与白菜地为对象,研究其施肥后的径流损失效果,发现常规化肥处理其径流氮流失要远高于沼液/猪粪堆肥与化肥混施处理,并且随着混施处理中猪粪堆肥用量的增加,其氮流失率也进一步降低;张笑千^[26]用美国农业部国家土壤侵蚀实验室已校准、验证过的APEX模型模拟比较了沼液施用与粪肥施用下氮素流失的差异,发现在相同的氮素施用量下,经过模拟降雨30 min后,粪肥处理组有0.8%的肥料随地表径流损失,而沼液处理组该数据为14.3%,远高于粪肥;夏红霞^[27]通过原位径流试验结果发现,有机肥处理在前期的氮磷流失浓度小于化肥。宁建凤等^[28]、陈永高等^[29]及张颖飞等^[30]也有类似研究结果,这些都佐证了氮流失强度为化肥>沼液>有机肥的结论。这其中原因可能是:首先猪粪有机肥释放缓慢,进入水体的量较少,部分被作物吸收,部分被径流带走,故流失强度最低;而常规化肥与沼液都是速效肥,在等氮量施用的情况下产生流失差异,从本研究中可以看出,两者氮流失是有时期差异的,即沼液在穗肥期流失量较化肥大,而化肥在基肥期流失量更大,考虑到相对应时期的氨挥发速率,可能是沼液基肥期剧烈的氨挥发损失了大量的氮,同时其降雨时间处于基肥后期,造成径流损失较化肥小;而穗肥期的降雨时间是施肥后第2 d,未给予沼液氨挥发太长时间,且此时期各处理各损失途径氮下降迅速。另外,杨润等^[21]发现沼液施灌后的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,这也与本研究中天面水氮含量下降趋势一致,在生产中有一定的指导意义。

4 结论

(1)在等施氮量条件下,常规化肥处理水稻产量达 $12\ 752.70\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其农田氨挥发总量为 $76.99\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,径流氮损失量 $39.11\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;100%沼液施用处理和75%沼液+25%猪粪有机肥配施处理氨挥发量较高,分别为 120.66 、 $88.01\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;而50%沼液+50%猪粪有机肥配施处理氨挥发总量和径流氮流失量均低于常规化肥处理,分别为 58.03 、 $22.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其产量与常规化肥处理相比无显著性差异;100%猪粪有机肥施用处理尽管氨挥发总量和径流氮流失量表现最低,但其产量低于50%沼液+50%猪粪有机肥配施处理。

(2)综合比较而言,50%沼液+50%猪粪有机肥配

合施用处理在保持一定产量的基础上又能减少氨挥发及氮流失风险,是一种比较适宜的施肥模式。

参考文献:

- [1] Huang L M. Financing rural renewable energy: A comparison between China and India[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1096-1103.
- [2] 王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 184-189.
WANG Fei, CAI Ya-qing, QIU Huan-guang. Current status, incentives and constraints for future development of biogas industry in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 184-189.
- [3] Jin H M, Chang Z Z. Distribution of heavy metal contents and chemical fractions in anaerobically digested manure slurry[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 164(3): 268-282.
- [4] Cao Y, Chang Z Z, Wang J D, et al. Potential use of anaerobically digested manure slurry to suppress Phytophthora root rot of chilli pepper[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 168: 124-131.
- [5] 朱建春,张增强,樊志民,等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地载荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 435-445.
ZHU Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435-445.
- [6] 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]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 291-296.
- [7] 杜臻杰,樊向阳,李中阳,等. 猪场沼液灌溉对冬小麦生长和品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 547-554.
DU Zhen-jie, FAN Xiang-yang, LI Zhong-yang, et al. Growth and grain quality of winter wheat irrigated with biogas liquid from a swine farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 547-554.
- [8] 史一鸣. 稻田生态系统消解沼液的潜力与风险评估[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
SHI Yi-ming. The potential capacity for paddy field ecosystem to decontaminate biogas slurry and its risks assessment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [9] 黄红英,曹金留,常志州,等. 猪粪沼液施用对稻、麦产量和氮磷吸收的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 412-418.
HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, CHANG Zhi-zhou, et al. Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous uptakes by rice and wheat[J]. *Soils*, 2013, 45(3): 412-418.
- [10] 陶磊,褚贵新,刘涛,等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6137-6146.
TAO Lei, CHU Gui-xin, LIU Tao, et al. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6137-6146.

- [11] Cassman K G, De Data S K. Long-term comparison of the agronomic efficiency and residual benefits of organic and inorganic nitrogen source for tropical lowland rice[J]. *Experimental Agriculture*, 1996, 32:427-444.
- [12] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11):1884-1888.
SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1884-1888.
- [13] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.
- [14] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5):778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):778-783.
- [15] 邓欧平, 姜丽娜, 陈丁江, 等. 大量沼液施灌稻田的氨挥发特征[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.
- [16] 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.
- [17] 孙雅杰, 吴文良, 刘原庆, 等. 有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(4):37-46.
SUN Ya-jie, WU Wen-liang, LIU Yuan-qing, et al. Effects of organic and mineral fertilizers on nitrogen utilization and losses[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(4):37-46.
- [18] Li J M, Xu M G, Qin D Z, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(1):51-56.
- [19] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P K. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system[J]. *Biology Fertility of Soils*, 2002, 36(3):207-214.
- [20] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田氨挥发损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5):1131-1139.
ZHANG Hui, YANG Zheng-li, LUO Liang-guo, et al. Study on the ammonia volatilization from paddy field in irrigation area of the Yellow River[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5):1131-1139.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 李艳, 唐良梁, 陈义, 等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2):392-397.
LI Yan, TANG Liang-liang, CHEN Yi, et al. The effects of nitrogen application rates on uptake, utilization and losses of nitrogen for rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2):392-397.
- [25] 张玉平, 荣湘民, 刘强, 等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):44-48, 54.
ZHANG Yu-ping, RONG Xiang-min, LIU Qiang, et al. Effects of combinations of organic and inorganic fertilizer on crop nutrient utilization rate, nitrogen and phosphorus loss in dry land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):44-48, 54.
- [26] 张笑千. 沼液农田施用氮素迁移转化规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHANG Xiao-qian. Dynamics of nitrogen transportation and transformation of field applied with digester effluents[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [27] 夏红霞. 有机肥对重庆地区紫色土农田氮磷流失特征的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
XIA Hong-xia. Effect of organic fertilizers on nitrogen and phosphorus losses from purple soil farmland in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [28] 宁建凤, 徐培智, 杨少海, 等. 有机无机肥配施对菜地土壤氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3):17-21.
NING Jian-feng, XU Pei-zhi, YANG Shao-hai, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on soil nitrogen runoff in vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):17-21.
- [29] 陈永高, 张瑞斌. 不同施肥模式对太湖流域农田土体氮磷流失与营养累积的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2):115-119.
CHEN Yong-gao, ZHANG Rui-bin. Effects of fertilization patterns on loss of soil nitrogen, phosphorus and nutrients accumulation in farmlands of Taihu Lake Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2):115-119.
- [30] 张颖飞, 蒋治国, 堵燕钰, 等. 不同施肥模式对蔬菜产量及菜地氮流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5):54-58.
ZHANG Ying-fei, JIANG Zhi-guo, DU Yan-yu, et al. Effects of different fertilization schemes on vegetable yield and nitrogen loss from vegetable fields[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5):54-58.