

不同比例沼液和尿素配施对稻田氨挥发的影响

高波, 王凯, 李红阳, 孙星星, 马晶晶, 张俊喜, 杨智青* (江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏盐城 224002)

摘要 [目的]研究不同比例沼液和尿素配施对稻田氨挥发的影响。[方法]采用稻田小区试验,以等量氮素施入量为标准,将沼液和尿素以不同比例混合,分3次施入。[结果]沼液与尿素配施下水稻3个施肥期(基肥、分蘖肥、穗肥)氨挥发均主要发生在施肥后前5~6 d,第7天氨挥发基本结束,施肥后3 d内氨挥发速率即可达到峰值;与仅施尿素相比,配施沼液使稻田氨挥发速率显著增加,其中基肥完全由沼液代替的处理,其氨挥发速率最大可达7.5 kg/(hm²·d);氨挥发损失量与沼液配施比例呈显著正相关,其中沼液配施比最大的处理下由氨挥发导致的氮素损失比例可达20.2%。[结论]适当降低沼液比例可明显减少氨挥发损失;沼液中大量氮素以NH₄⁺-N的形式存在是沼液还田后增加氨挥发的主要原因之一,此外,高温也能增加沼液的挥发强度,加速铵态氮的流失。

关键词 沼液;尿素;配施;氨挥发;稻田

中图分类号 S141 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0154-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.041



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Surface Application of Biogas Slurry and Urea in Different Proportions on Ammonia Volatilization in Paddy Field

GAO Bo, WANG Kai, LI Hong-yang et al (Jiangsu Coastal Area Institute of Agricultural Sciences, Yancheng, Jiangsu 224002)

Abstract [Objective] To study the effect of different proportions of biogas slurry and urea on ammonia volatilization in paddy field. [Method] Paddy plot experiment was carried out. The biogas slurry and urea were mixed in different proportions and applied in three times with the same amount of nitrogen as the standard. [Result] Under the combined application of biogas slurry and urea, ammonia volatilization mainly occurred in the first 5-6 days after fertilization (basal, tillering and earing). The ammonia volatilization rate basically ended on the 7th day, and the peak value of ammonia volatilization rate could be reached within 3 days after fertilization. Compared with urea only, treatments combined with biogas slurry significantly increased ammonia volatilization rate, and the maximum ammonia volatilization rate reached 7.5 kg/(hm²·d) when biogas slurry completely replaced the urea in basal. There was a significant positive correlation between ammonia volatilization loss and biogas slurry application ratio, and the maximum ratio of nitrogen loss caused by ammonia volatilization was 20.2% in the treatment with the largest biogas slurry application ratio. [Conclusion] Ammonia volatilization loss can be significantly reduced by appropriately reducing the biogas slurry ratio. A large amount of nitrogen in the form of NH₄⁺-N in biogas slurry is the main reason for increasing ammonia volatilization after biogas slurry returning to the field. High temperature can increase the volatilization intensity of biogas slurry and accelerate the loss of ammonium nitrogen. Therefore, high temperature weather should be avoided when biogas slurry is returned to the field.

Key words Biogas slurry; Urea; Combine application; Ammonia volatilization; Paddy field

沼气工程是一项将畜禽养殖排泄物通过厌氧发酵的方式,实现资源再利用、促进农业良性循环的生态工程^[1],随着规模化畜禽养殖业的持续发展和发酵工艺的不断完善,沼气工程将得到越来越多的应用与推广。畜禽粪便经发酵后产生沼液和固体沼渣,其中固体产物可通过堆肥实现资源再利用,而沼液因排放量较大,难以实现对其养分的科学管理和利用,是制约沼气工程发展的重要因素之一^[2-3]。沼液中含有大量可被作物直接吸收的氮、磷、钾等养分,如猪粪沼液的总氮浓度可达400~700 mg/L^[2],因此沼液被认为是一种优质液体有机肥,有较高的还田价值^[4-5],目前国内外主要采用漫灌的方式进行沼液还田。尽管沼液还田可以实现沼液的大量消解,但研究表明,沼液代替化肥表施于农田易造成氨挥发损失^[6-7],且在相同施氮量的条件下,沼液肥NH₃-N损失量远高于常规化肥^[8]。沼液完全代替化肥施入农田,不仅造成养分流失,产生的大量氨挥发还会增加大气环境的污染风险,因此科学管理沼液的还田方式对稻田消解沼液具有重

要意义。笔者基于大田试验,分别在水稻施用基肥、分蘖肥和穗肥的过程中,设置不同沼液与尿素的配施比例处理,研究各处理下NH₃-N损失特征及其影响因素,为进一步明确沼液还田的NH₃-N损失规律,同时在保证作物养分供应的前提下降低氨挥发污染风险,以期获得最优的沼液还田方式提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于2017年在江苏沿海地区农业科学研究所试验场内(120°26'E,33°32'N)试验田进行,试验土壤类型为砂壤土,土壤理化性质:土壤容重1.27 g/cm³,pH 8.1,有机质27.02 g/kg,全氮1.35 g/kg,速效磷28.14 mg/kg,速效钾92.18 mg/kg。

1.2 试验材料 试验所施用的沼液来自盐城市某规模化养猪场,沼液的主要理化性质:pH 7.5,总氮含量为1.18 g/L,铵态氮含量为0.96 g/L,硝态氮含量为0.03 g/L,有机质含量为2.50 g/L。试验所用水稻品种为籼型两系杂交品种两优华占。

1.3 试验设计 试验为田间定位试验,所有肥料均按照当地施肥平均标准施入,其中磷肥(过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾)施用量分别为625.5和138.9 kg/hm²,氮肥按当地施肥习惯分3次施入,其中基肥施入40%,2次追肥分别施入35%和25%,以施用300 kg/hm²纯氮为标准设置CF(仅施用尿素)、T1(CF-N:BS-N=4:1)、T2(CF-N:BS-N=3:2)、T3(CF

基金项目 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(16)1003);苏北科技专项“猪粪沼液高效还田技术集成与示范”(SZ-YC202008);江苏省盐土(滩涂)重点实验室开放课题(JKLBS2020011);江苏省科技(社会发展)项目(BE2018680)。

作者简介 高波(1989—),男,江苏宝应人,助理研究员,硕士,从事农业资源与环境研究。*通信作者,副研究员,从事畜禽养殖与资源开发利用研究。

收稿日期 2021-04-14;修回日期 2021-05-20

-N:BS-N=2:3)、T4(CF-N:BS-N=1:4)以及CK(对照,不施尿素和沼液)共6个处理(CF-N即尿素-N;BS-N即沼液-N),重复3次,小区面积12.0 m²,随机排列,各处理的实际

施肥量见表1。各小区之间筑以田埂并用塑料薄膜隔离,防止发生水肥互渗。采样期间天气信息见表2。

表1 尿素与沼液不同配比处理下施肥量

Table 1 Fertilizer application under different ratio of urea and biogas slurry treatment

处理 Treatment	施肥时期 Fertilization period						施肥总量	
	基肥 Basal		分蘖肥 Tillering		穗肥 Earing		Total fertilization amount	
	CF//g/区	BS//L/区	CF//g/区	BS//L/区	CF//g/区	BS//L/区	CF//g/区	BS//L/区
CK	—	—	—	—	—	—	—	—
CF	312.9	—	273.8	—	195.5	—	782.2	—
T1	156.4	61.0	273.8	—	195.5	—	625.7	61.0
T2	—	122.0	273.8	—	195.5	—	469.3	122.0
T3	—	122.0	117.3	61.0	195.5	—	312.8	183.0
T4	—	122.0	—	106.8	156.4	15.3	156.4	244.1

注:CF即尿素;BS即沼液

Note:CF was urea,BS was biogas slurry

表2 试验期间天气信息

Table 2 Weather information during the study

施肥时期 Fertilization period	施肥后天数 Days after fertilization//d	天气 Weather	最高气温 Max temperature//℃	最低气温 Min temperature//℃	风力 Wind//级
基肥 Basal	1	晴	31	18	4
	2	晴	31	19	4
	3	多云	30	22	4
	4	阴	27	22	2
	5	多云	30	21	3
	6	多云	29	21	3
	7	阴	29	22	2
分蘖肥 Tillering	1	多云	29	20	2
	2	多云	31	22	3
	3	多云	31	22	1
	4	多云	31	22	3
	5	小雨	28	23	1
	6	小雨	28	24	1
	7	中雨	27	23	1
穗肥 Earing	1	阴	34	28	4
	2	多云	33	28	2
	3	小雨	33	27	1
	4	多云	33	28	2
	5	雷阵雨	34	27	2
	6	多云	35	27	1
	7	小雨	34	27	1

1.4 样品采集 氨挥发样品采用通气法^[9]收集,即分别将2块厚度2 cm、直径16 cm的海绵均匀浸以15 mL磷酸甘油溶液并置于聚氯乙烯硬质塑料管内部(内部直径16 cm、高25 cm),上层海绵置于顶部以隔绝外部气体干扰,下层海绵置于距底面15 cm用以收集氨挥发,各小区放置2个采样罩,采样结束后合并2个采样罩的下层海绵代表该小区的样品,采样阶段为施肥后7 d,每天09:00—11:00和14:00—16:00各采样一次,每次采样结束后取出下层海绵并立即放于自封袋中带回实验室,浸泡于500 mL 1 mol/L氯化钾溶液中振荡1 h,再用靛酚蓝比色法测定溶液中的铵态氮浓度。氨挥发通量计算公式:

$$F_i = (C_{1i} + C_{2i}) \times V / S \times 6$$

式中, F_i 为第*i*天的氨挥发量,kg/(m²·d); C_{1i} 和 C_{2i} 分别代表第*i*天上午和下午浸提液中铵态氮浓度,mg/mL; V 为浸提液体积,mL; S 为采样罩底面积,m²。

1.5 数据处理 利用Microsoft Excel 2016进行数据分析和图表绘制,用SPSS 20.0软件进行数据标准化和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 配施沼液对稻田氨挥发动态的影响 不同比例沼液与尿素配施对水稻不同施肥时期施肥后7 d内氨挥发速率的影响见图1。与CK和仅施用尿素的处理(CF)相比,配施沼液处理使稻田氨挥发速率显著增加,且均在施肥后3 d内达到峰值,其中基肥(图1a)完全由沼液代替的T2、T3、T4处理氨挥发速率最大值可达7.5 kg/(hm²·d);T1处理由于沼液比例较少而使氨挥发速率显著低于上述3个处理,可见加入沼液是增加稻田氨挥发速率的首要影响因素;分蘖肥(图1b)和穗肥(图1c)时期同样表现出这一现象。与仅施用尿素的处理(CF)一致,配施沼液处理下,3个施肥期氨挥发损失主要发生在施肥后的前5~6 d,第7天氨挥发基本结束,这与人研究基本一致^[10]。

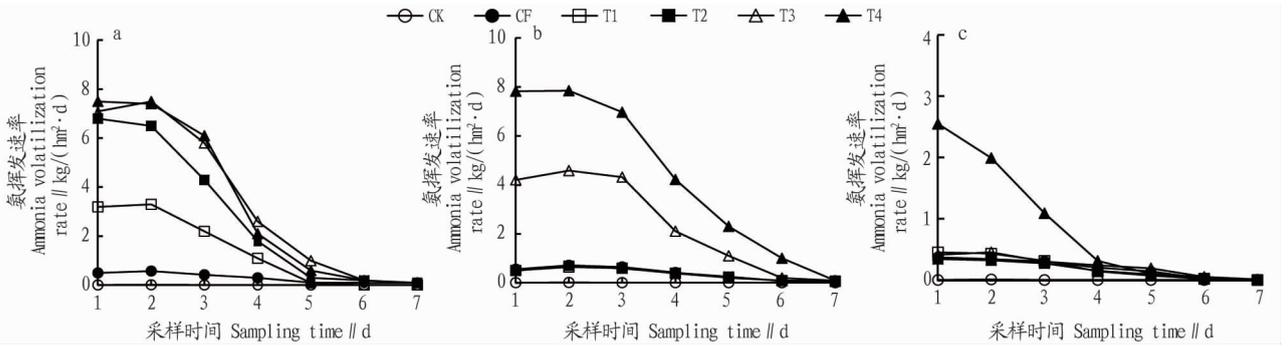


图1 水稻基肥(a)、分蘖肥(b)和穗肥(c)配施沼液对氨挥发速率的影响

Fig. 1 Effects of biogas slurry combined with urea in rice base fertilizer (a), tillering fertilizer (b) and panicle fertilizer (c) on ammonia volatilization rate

2.2 配施沼液对稻田 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量的影响 不同比例沼液和尿素配施对稻田 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量的影响见图2。由图2可知,由于3次施肥中基肥施氮量占总施氮量比例最大(40%),因此相较于分蘖肥和穗肥,基肥 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量也较大,其次是分蘖肥;但T4处理由于沼液配施比例较大,其分蘖肥所产生的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量与基肥相当,二者之和约占3次施肥所产生 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失总量的90%。从不同配施处理看,沼液配施比例最大的T4处理 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量最高,3次施肥累积损失 $\text{NH}_3\text{-N}$ 达 $60.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$;T3处理由于分蘖肥和穗肥中均加入了沼液,其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量仅次于T4;T1和T2仅在基肥中配施了沼液,因此 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量明显低于T3和T4,但仍是常规尿素(CF)的2倍多。不同沼液配施量与稻田 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量的关系见图3,总体上沼液配施量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量呈显著正相关($R^2=0.9744, n=6$)。

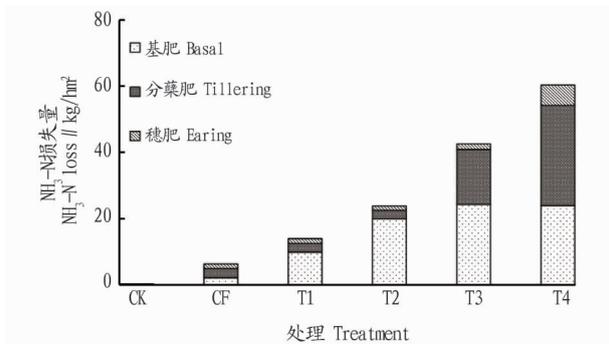


图2 水稻基肥、分蘖肥和穗肥配施沼液对氨挥发氮素损失量的影响

Fig. 2 Effects of biogas slurry combined with urea in rice base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer on ammonia volatilization nitrogen loss

不同沼液与尿素配施处理下,氨挥发导致的氮素损失量占总施氮的比例见表3。由表3可知,总体上不同处理下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失率随着沼液配施比例的增加而增加,其中沼液配施比例最大的T4处理,由氨挥发导致的氮素损失比例最大(20.2%),而常规尿素处理(CF) $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失率仅有2.1%。从不同施肥时期看,未配施沼液的CF处理在分蘖肥期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失率大于基肥期和穗肥期,而3个施肥期均配施沼液的T4处理也同样表现出分蘖肥期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失率大

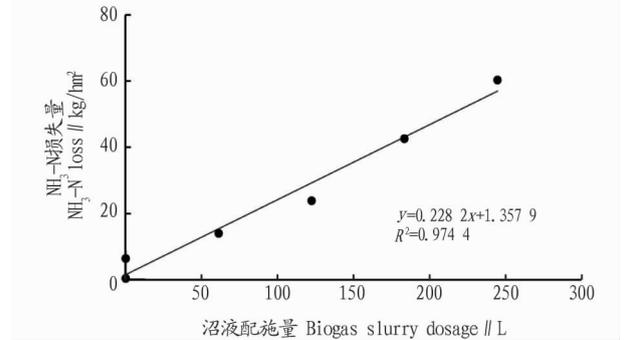


图3 不同沼液配施量与稻田 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失量的关系

Fig. 3 Relationship between different biogas slurry application amounts and $\text{NH}_3\text{-N}$ loss in paddy field

于其他2个时期。

表3 沼液与尿素配施对水稻各施肥期 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失率的影响

Table 3 Effects of combined application of biogas slurry and urea on $\text{NH}_3\text{-N}$ loss rate of rice in each fertilization period %

处理 Treatment	施肥时期 Fertilization period			总损失率 Total loss
	基肥 Basal	分蘖肥 Tillering	穗肥 Earing	
CK	—	—	—	—
CF	1.8	2.6	1.9	2.1
T1	8.3	2.4	2.0	4.7
T2	16.7	2.5	1.7	8.0
T3	20.3	15.9	2.3	14.0
T4	20.0	28.9	8.2	20.2

3 讨论

从沼液本身的特点来看,该研究所用沼液中所含氮素主要为铵态氮(约80%),研究显示沼液中有超过70%的氮素是以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在^[11],施入土壤后这部分铵态氮可直接分解成气态氨而挥发^[2]。研究表明畜禽粪便发酵产生的沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是还田后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 损失最主要的贡献因子^[12],李喜喜等^[13]研究发现,稻田氨挥发通量与田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈显著正相关关系,田玉华等^[14]、杨士红等^[15]研究也发现了相似的现象。此外,靳红梅等^[6]研究发现,猪粪沼液还田后增加氨挥发速率的主要原因除增加土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量,还因为沼液中含有大量可溶性有机碳,可激发土壤有机氮的矿化^[12,16],特别是在沼液还田48h后,沼液本身所含

有的 NH_4^+-N 已被大量消耗,此后所产生的氨挥发很有可能是土壤中有有机氮的矿化而造成。

从环境因素看,该研究中基肥和分蘖肥时期施肥后 3 d 内最高气温平均超过 $30\text{ }^\circ\text{C}$,对应的氨挥发速率均高于此后的 4~7 d,因此温度可能是影响稻田氨挥发的重要因子之一。靳红梅等^[6] 研究指出土壤温度对氨挥发的影响最大,沼液施入土壤后有超过 58% 的氨挥发损失与温度相关,这也可以用于解释夏季氨挥发速率大幅高于冬季的现象。温度影响沼液还田后的氨挥发主要有 2 个方面,一方面是高温能够增加沼液的挥发强度,加速铵态氮的流失;另一方面高温可增加土壤微生物活性,促进有机氮的分解而增加铵态氮的挥发量^[17]。因此,沼液还田时应尽量避免高温天气,既能减少氮素流失,也能降低对大气环境的污染。

该研究所用沼液为畜禽粪污发酵而来,其中含有大量作物生长所需的营养成分^[18-19],稻田这一人工湿地为消解沼液提供了巨大潜力。然而,该试验结果显示,在水稻不同施肥期加入沼液将明显增加稻田氨挥发量和由此造成的氮素损失率,这不仅会增加大气 NH_3 浓度,还可能影响水稻生长过程中的氮素供应,因此还需深入认识稻田氨挥发的影响因素,科学配施沼液才能降低沼液还田后可能带来的影响。

4 结论

(1) 与仅施用常规尿素相比,沼液与尿素配施大幅增加土壤氨挥发速率,不同比例沼液与尿素混合施入稻田所产生的氨挥发主要发生在施肥后 7 d 内,且挥发速率在施肥后 3 d 内达到峰值。

(2) 同等氮素施入量的背景下,配施沼液将增加 NH_3-N 的损失量和损失率,但适当降低沼液配施比例可明显降低氨挥发损失量。

(3) 水稻生长季进行沼液还田要特别关注施肥后 7 d 内天气情况,避免高温增加沼液的挥发。

(上接第 153 页)

[3] 曹逼力,徐坤,石健,等. 硅对番茄生长及光合作用与蒸腾作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):354-360.

[4] 刘媛. 硅对水培黄瓜生理特性和营养品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[5] 苗锦山. 硅对设施厚皮甜瓜弱光胁迫的调控效果[J]. 北方园艺,2017(6):52-55.

[6] 张清华,刘震,赵跃锋,等. 硅对西瓜叶片矿质元素积累与生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2020,48(1):160-162,166.

[7] 赵晓美,李正为,杨家源,等. 不同浓度钙元素对西瓜生长发育及产量品质的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(4):1987-1988,2040.

[8] 唐小付,龙明华,马中才,等. 西瓜深液流水培品种适应性比较试验[J]. 长江蔬菜,2008(11):42-44.

[9] 赵晓美,王红梅,杨卫,等. 钙对西瓜幼苗生长、光合特性及保护性酶活性的影响[J]. 北方园艺,2012(14):144-146.

[10] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京:科学出版社,2009:97-100.

[11] EPSTEIN E. The anomaly of silicon in plant biology[J]. Proceedings of the national academy of science USA,1994,91(1):11-17.

[12] 梁颖,石玉,赵鑫,等. 低磷条件下硅对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(2):151-160.

[13] 郑世英,郑晓彤,耿建芬,等. 硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. 大豆科学,2018,37(2):263-267.

参考文献

[1] 赵玲,刘庆玉,牛卫生,等. 沼气工程发展现状与问题探讨[J]. 农机化研究,2011,33(4):242-245.

[2] 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,2011,27(1):291-296.

[3] 汤云川,张卫峰,张福锁,等. 户用沼气工程发展对农田养分流动的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(8):192-199.

[4] 沈其林,单胜道,周健驹,等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气,2014,32(3):83-86.

[5] 尹冬雪,刘伟,周罕宽,等. 沼液农用综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学,2018,46(3):15-17.

[6] 靳红梅,常志州,吴华山,等. 菜地追施猪粪沼液后 NH_3 和 N_2O 排放特征及氮损失率[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1155-1165.

[7] 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.

[8] BOUWMAN A F,BOUMANS L J M,BATJES N H. Estimation of global NH_3 volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. Global biogeochemical cycles,2002,16(2):215-224.

[9] 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.

[10] 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 沼肥表施对土壤氮素动态分布及氨挥发的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(7):139-143.

[11] 靳红梅,付广青,常志州,等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. 农业工程学报,2012,28(21):208-214.

[12] MARTINES A M,NOGUEIRA M A,SANTOS C A,et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. Bioresource technology,2010,101(12):4690-4696.

[13] 李喜喜,杨娟,王昌全,等. 猪粪施用对成都平原稻季氨挥发特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(11):2236-2244.

[14] 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.

[15] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(11):99-104.

[16] SOMMER S G,GÉNERMONT S,CELLIER P,et al. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field[J]. European journal of agronomy,2003,19(4):465-486.

[17] MOORHEAD D L,SINBAUGH R L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction[J]. Ecological monographs,2006,76(2):151-174.

[18] 李玮雯,曲英华,徐奕琳,等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. 中国沼气,2012,30(3):17-20,24.

[19] 曹云,常志州,马艳,等. 猪粪沼液防治辣椒疫病机理研究——沼液中铵与腐殖酸的作用[J]. 中国生态农业学报,2013,21(9):1119-1126.

[14] 李清芳,马成仓,李韩平,等. 土壤有效硅对大豆生长发育和生理功能的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(1):73-76.

[15] 刘慧霞,李晓蓉,郭正刚. 硅对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长发育的影响[J]. 草业学报,2011,20(1):155-160.

[16] 张平艳,高荣广,杨凤娟,等. 硅对连作黄瓜幼苗光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1733-1738.

[17] 马成仓,李清芳,束良佐,等. 硅对玉米种子萌发和幼苗生长作用机制初探[J]. 作物学报,2002,28(5):665-669.

[18] 魏国强,朱祝军,钱琼秋. 硅对黄瓜幼苗生长及活性氧清除系统的影响[J]. 中国蔬菜,2003(5):10-12.

[19] 李清芳,马成仓. 土壤有效硅对棉花幼苗营养代谢的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(6):726-730.

[20] 刘景凯,刘世琦,冯磊,等. 硅对青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):989-997.

[21] 蒋英,姜晓君. 硅对西瓜幼苗光合色素、光合参数及矿质元素吸收的影响[J]. 天津农业科学,2019,25(9):15-18.

[22] 陆景陵. 植物营养学[M]. 2版. 北京:中国农业大学出版社,2003:111.

[23] 李清芳,马成仓,尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(3):531-536.

[24] 曾瑞儿,王鑫悦,侯雪莹,等. 硅对干旱胁迫下花生幼苗生长和生理特性的影响[J]. 花生学报,2018,47(4):13-18.

[25] 张环纬,陈彪,温心怡,等. 外源硅对干旱胁迫下烟草幼苗生长、叶片光合及生理指标的影响[J]. 生物技术通报,2019,35(1):17-26.