

追施沼液对不同 pH 土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

靳红梅, 常志州

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014)

摘要:摸清不同 pH 土壤施用沼液后 CH₄ 和 N₂O 的排放特征,对沼液农田回用的有效性及其养分管理具有重要意义。通过盆栽试验,探讨了猪粪沼液在 pH 为 5.5(S5.5)、6.5(S6.5)和 8.2(S8.2)的菜地土壤追施后 CH₄ 和 N₂O 气体的排放特征。研究发现,不同 pH 菜地土壤追施猪粪沼液后,CH₄ 和 N₂O 排放速率和总量增加,特别是在 S6.5 和 S8.2 土壤中,二者增幅均显著高于施用化肥的处理。追施猪粪沼液后,CH₄ 在 pH 较低的土壤(S5.5 和 S6.5)开始表现为负排放,随后逐渐表现为正排放,而在 pH 较高的土壤(S8.2)始终为正排放。N₂O 的排放表现为:S5.5 土壤仅在第三次施沼液后,其 N₂O 瞬时排放速率显著高于施用化肥和对照处理;而在 S6.5 和 S8.2 土壤 N₂O 排放速率均显著增加,其平均排放速率显著高于施用化肥和对照处理。追施沼液后,整个生长季内 CH₄ 平均排放量在不同 pH 土壤间的变化趋势为 S8.2>S6.5>S5.5, N₂O 排放的变化趋势为 S6.5>S8.2>S5.5。碱性土壤上施用沼液会增加其氮素损失和环境污染的可能性。

关键词:猪粪沼液;CH₄ 和 N₂O 排放;土壤 pH

中图分类号:X71 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)08-1648-08 **doi:**10.11654/jaes.2013.08.023

Effect of Soil pH on CH₄ and N₂O Emissions After Topdressing Digested Pig Slurry

JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China)

Abstract: Applying the digested slurries to land is the most attractive and effective alternative in terms of economic and nutrient recycling issues. In order to better management of the nutrient of digested slurries, it is important to study the correspondences of greenhouse gases (CH₄ and N₂O emissions) to soil pH. In this study, soils with pH of 5.5(S5.5), 6.5(S6.5) and 8.2(S8.2) were used to the pot experiment to study the effect of digested pig slurry (DPS) application on emissions of CH₄ and N₂O. Meanwhile, the application of chemical fertilizer (CF) and water without fertilizer (CT) were used to compare with DPS. The vegetable planting in the pot was crown daisy (*Chrysanthemum carinatum* Schousb.). Results showed that emissions of CH₄ and N₂O increased after application of DPS. In S6.5 and S8.2, the increases of CH₄ and N₂O in DPS were significant compared with CF treatments. CH₄ was negative release in lower pH soils, such as S5.5 and S6.5, after the early application of DPS. After that the emission became positive. But CH₄ in S8.2 was always positive release. N₂O in S5.5 was significantly higher in DPS treatments than that in CF and CT treatments at the third topdressing; while N₂O in S6.5 and S8.2 were significantly higher than those in CF and CT treatments during the whole the growing period of crown daisy. The trend of average emission of CH₄ in different soils was S8.2>S6.5>S5.5 after application of DPS, while that of N₂O was S6.5>S8.2>S5.5. There was environmental risk after application of digested slurries in alkali soils.

Keywords: digested pig slurry; CH₄ and N₂O emissions; soil pH

厌氧发酵产沼气技术是规模化畜禽养殖场粪污,特别是尿液及废水资源化处理的有效手段。随着沼气

工程的快速发展,全国每年沼液排放量超过 1.3 亿 t^[1],其有效处理成为亟待解决的问题。沼液含有大量氮、磷、钾等营养元素,将其还田利用是目前国内外对沼液最有效和最普遍的消纳方式^[2-4]。沼液还田过程中还面临着诸多的问题,如施用量、频率、施入方式及装备、肥料利用、生态环境效应等。其中,量化沼液还田后的温室气体排放是其资源化的一项重要内容。

收稿日期:2013-04-20

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903011-01);国家自然科学基金(21107038);江苏省自主创新项目(CX(12)5055)

作者简介:靳红梅(1982—),女,河北吴桥人,博士,副研究员,主要从事农业废弃物资源化利用方面的研究。

E-mail:jinhm1201@hotmail.com

CH₄ 和 N₂O 是大气中主要的温室气体,农田是二者的主要来源之一^[5]。农田施用沼液后,可能导致稻麦系统及菜地 CH₄ 和 N₂O 排放增加^[6-7]。除了作物类型及肥料运筹外,土壤条件也是影响其排放量的重要因子^[8-9]。土壤 pH 对肥料输入后温室气体排放的响应差异主要与控制土壤有机质周转的微生物活动密切相关^[10]。Kemmitt 等通过对沙壤土 pH 人为改造 37 年后发现,在 pH 3.4~6.3 范围内土壤微生物生物量碳、氮和硝化作用与 pH 显著正相关^[11]。

摸清不同 pH 土壤施用沼液后对 CH₄ 和 N₂O 排放的响应,对沼液在农田的有效利用及其养分管理具有重要的意义,但目前这方面的研究较为缺乏。本研究通过盆栽试验,探讨沼液在 pH 为 5.5、6.5 和 8.2 的土壤施用后 CH₄ 和 N₂O 气体的排放特征。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土样一(S5.5):取自江苏省农业科学院内的蔬菜试验地,种植年限为 10 年。土壤为黄壤土,0~20 cm 土层土壤 pH 为 5.46,土壤有机碳(SOC)18.06±0.23 g·kg⁻¹(平均值±标准误,n=4),总氮(TN)2.33±0.04 g·kg⁻¹,碳氮比 7.75;土样二(S6.5):取自江苏省农业科学院六合动物科学基地的无公害蔬菜大棚,土壤类型为黄马肝土。0~20 cm 土层土壤 pH 6.49,SOC 12.04±0.33 g·kg⁻¹,TN 1.47±0.16 g·kg⁻¹,碳氮比 8.19;土样三(S8.2):取自盐城工学院附近的蔬菜试验田,土壤类型为灰杂土。0~20 cm 土层土壤 pH 8.19,SOC 10.84±0.53 g·kg⁻¹,TN 1.07±0.16 g·kg⁻¹,碳氮比 10.13。

将 0~20 cm 土层土壤取出后过 2 mm 筛,除去作物凋枯物、根系和石块后备用。

1.2 供试沼液

供试沼液取自江苏省农业科学院六合动物科学基地的沼气池,发酵原料为猪场的粪尿及冲圈废水,反应器类型为连续搅拌反应器系统(continuous stirred-tank reactor, CSTR),自 2010 年开始正常运

行。沼液于试验开始前 7 d 一次性取出,置于 PVC 桶内贮存,其基本理化性状为:pH 7.41,干物质含量 0.12%,总有机碳(TOC)321.5 mg·L⁻¹,TN 431.5 mg·L⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N)371.2 mg·L⁻¹,总磷(TP)46.1 mg·L⁻¹,可溶性磷(DP)19.3 mg·L⁻¹,总钾(TK)299.7 mg·L⁻¹。

1.3 试验处理

每种土壤为一组,将前处理好的土壤以 2.5 kg·盆⁻¹装入直径为 18 cm、高 15 cm 的塑料盆中。每组共 9 盆,每盆播种大叶茼蒿(*Chrysanthemum carinatum* Schousb.)10 粒。

每组土壤设置 3 个追肥处理,分别为:施用猪粪沼液(DPS)、施用化肥(CF),以及空白处理(CT)。由于沼液中还含有大量的 P 和 K,为使各追肥处理的 N、P 和 K 的用量一致,施用化肥的处理除了施用尿素作为 N 源外,还添加了磷酸氢二钾(K₂HPO₄·3H₂O)和硫酸钾(K₂SO₄)作为 P 和 K 的补充,使各处理 N、P、K 水平保持一致,具体添加量见表 1。

每个处理重复 3 次,整个试验共有盆钵 27 个,置于院内网室大棚中。在大叶茼蒿生长期共追肥 4 次,即播种后第 18 d(I₁)、30 d(I₂)、42 d(I₃)和 54 d(I₄)。人工用喷壶洒施均匀。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤理化指标的测定

大棚气温和 0~10 cm 土壤温度采用温度记录仪(WS-T41PRO,杭州微松环境科技有限公司)实时监测。土壤 pH 采用 pH 计(PHS-2F,上海精密科学仪器有限公司)测定,水土比为 2.5:1(V/W)。EC 采用电导率仪(雷磁 DDS-307,上海精科)测定。SOC 采用重铬酸钾氧化滴定法测定^[12];TN 采用凯氏定氮仪(Gerhardt Vapodest 30s, Germany)测定。

1.4.2 温室气体的测定

温室气体的测定采用静态箱法。箱体由 PVC 管制成,直径为 20 cm,高 50 cm,四周和顶部密封。箱体顶端留有 2 个 1 cm 直径的管孔,用橡胶塞密封,一个用于插入温度计,另一个作为气体取样口。管罩与盆

表 1 各追肥处理养分添加量
Table 1 Nutrient addition in each treatment

处理编码	追肥处理	沼液量/mL	化肥量/mg			水/mL
			Urea	K ₂ HPO ₄	K ₂ SO ₄	
DPS	100%沼液	150	—	—	—	—
CF	100%化肥	—	137.7	50.8	47.7	150
CT	100%清水	—	—	—	—	150

钵用水密封,其他接口处用硅胶密封,形成一个密闭的气室。气体采集时间为播种后的第5、11、18、22、30、34、42、46、54、58 d,取样时间为9:00~11:00。采样时将静态箱罩在盆钵边缘的水槽,注水密封。密封后每8 min用50 mL带有三通气阀(Terumo, Japan)的针管将气体导入100 mL预先抽真空的铝箔采样袋(大连德霖气体包装有限公司,中国)中,每盆共采样3次。同时用温度计测定箱内温度。

气样带回实验室24 h内完成测定。利用Agilent 7890A气相色谱仪(Agilent Technologies, America)测定同一气样中CH₄和N₂O浓度,分离柱为Porapak Q填充柱(80/100目)。CH₄检测器为氢火焰离子化检测器(FID),载气为高纯氮气,流速40 mL·min⁻¹;N₂O检测器为含⁶³Ni的微电子捕获器(uECD),载气为95%氩气+5%甲烷,流速40 mL·min⁻¹。柱温60℃,检测温度为300℃。标准气体由中国计量科学研究院提供。气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times h \times (dc/dt) \times 273 / (273 + T)$$

式中: F 为气体排放通量,μg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为标准状态下气体的密度,kg·m⁻³,CH₄为0.714,N₂O为1.25; h 为采样箱顶部至所覆盖土壤表面的高度,m; dc/dt 为单位时间采样箱内气体的浓度变化,10⁻⁶·h⁻¹;273为气态方程常数; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,K。

2 结果与分析

2.1 土壤理化指标的变化

生长期大棚内气温为13.9~28.3℃,0~10 cm土层温度为14.7~29.1℃,不同处理土壤间温度无显著差异(图1)。施用猪粪沼液后土壤pH有所升高,但是在S5.5和S8.2土壤中提高不显著(表2);在S6.5土

壤中,施用猪粪沼液处理的土壤pH显著高于施用化肥的处理($P < 0.05$)。施用猪粪沼液对土壤EC的影响较为显著,在S6.5和S8.2土壤中,施用沼液后土壤EC均显著高于施用化肥处理和对照($P < 0.05$),主要是由于沼液中含有大量的盐分。在S5.5土壤中,DPS处理的SOC显著($P < 0.05$)高于CF和CT处理,其他土壤DPS处理和CF处理对SOC和TN含量的影响差异不显著(表2)。

2.2 CH₄排放特征

追肥前(5 d和11 d),不同pH土壤CH₄的瞬时排放速率无显著差异;追肥后,土壤CH₄排放速率明显增加(图2),特别是S5.5和S8.2土壤增幅显著($P < 0.05$)。S5.5土壤第一次施用沼液后,CH₄排放速率逐渐降低为负排放,直至第二次施肥后,CH₄激增为正排放(图2a)。而S8.2土壤施用沼液后,CH₄排放速率始终为正排放,但第三次追肥后CH₄排放速率有所降低(图2c)。S6.5土壤第一次施用沼液后,CH₄排放速

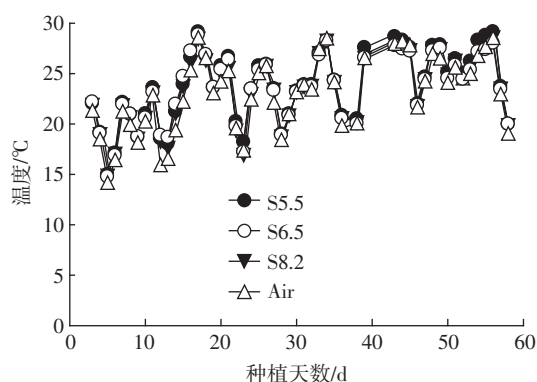


图1 生长期大棚内气温及盆钵内土壤温度

Figure 1 Air and soil temperature during the growing period of crown daisy

表2 试验结束后土壤理化指标

Table 2 Physical and chemical characteristics after the experiment

土壤类型	处理	pH	EC/mS·cm ⁻¹	SOC/mg·kg ⁻¹	TN/mg·kg ⁻¹
S5.5	DPS	5.44±0.04a	2.87±0.22a	22.58±0.25a	2.45±0.26a
	CF	5.31±0.10a	2.74±0.39a	20.95±0.33ab	2.09±0.09ab
	CT	5.16±0.09a	2.25±0.42a	20.72±0.74b	1.66±0.06b
S6.5	DPS	6.50±0.10a	0.35±0.03a	12.41±0.96a	1.75±0.23a
	CF	5.99±0.04b	0.20±0.03b	11.66±1.13a	1.65±0.04a
	CT	6.36±0.01a	0.18±0.04b	10.50±0.53a	1.63±0.12a
S8.2	DPS	8.60±0.06a	0.86±0.04a	9.57±0.67a	0.93±0.30a
	CF	8.68±0.11a	0.66±0.04b	11.44±0.74a	0.95±0.21a
	CT	8.67±0.03a	0.63±0.01b	10.33±0.35a	1.07±0.14a

注:不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

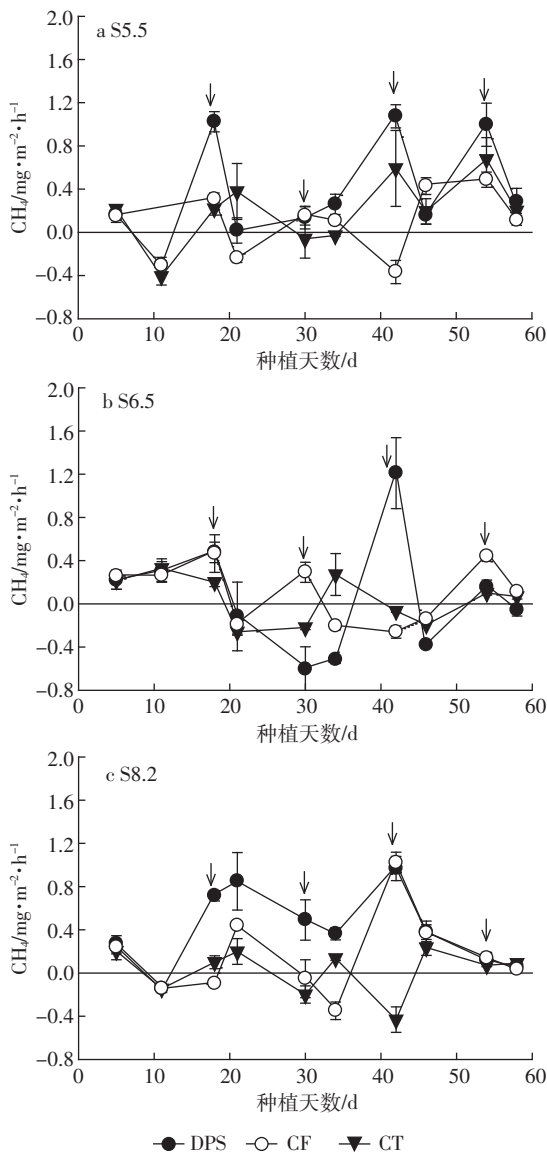
率逐渐降低为负排放,直至第三次施肥后,CH₄激增为正排放(图 2c)。

S5.5 和 S8.2 土壤追施沼液的处理其 CH₄ 排放速率显著高于施用化肥和对照处理(图 2a, 图 2c),即 DPS>CF>CT($P<0.05$;表 3),生长期内 CH₄ 平均排放速率显著高于其他处理($P<0.05$,图 4a,图 4c),分别较对照增加 0.47 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 0.22 mg·m⁻²·h⁻¹(图 5a);S6.5 土壤追肥后,生长期内 CH₄ 平均排放速率在各肥料处理间无显著差异(图 4a~图 4c),即追施沼液和化肥后分别较对照增加了 0.03 mg·m⁻²·h⁻¹,追施化肥

后增加了 0.08 mg·m⁻²·h⁻¹(图 5a)。

2.3 N₂O 排放特征

同 CH₄ 变化趋势相似,追肥前不同 pH 土壤 N₂O 的瞬时排放速率无显著差异;追肥后,土壤 N₂O 的瞬时排放速率有所增加(图 3)。S5.5 土壤仅在第三次施肥后,DPS 处理的 N₂O 瞬时排放速率显著高于 CF 和 CT($P<0.05$,表 3;图 3a),整个生长期土壤平均 N₂O 排放速率在各追肥处理间无显著差异(图 4d),DPS 和 CF 处理中 N₂O 的平均排放速率与对照相比仅分别增加了 0.27、0.19 mg·m⁻²·h⁻¹(图 5b)。追施沼液后,S6.5 和 S8.2 土壤 N₂O 排放速率显著增加($P<0.05$,表



箭头表示追肥时间;DPS、CF 和 CT 分别表示追施沼液、化肥和对照处理,下同

图 2 蔬菜生长期内 CH₄ 排放通量的动态变化

Figure 2 Dynamics of CH₄ emission during the growing period of crown daisy

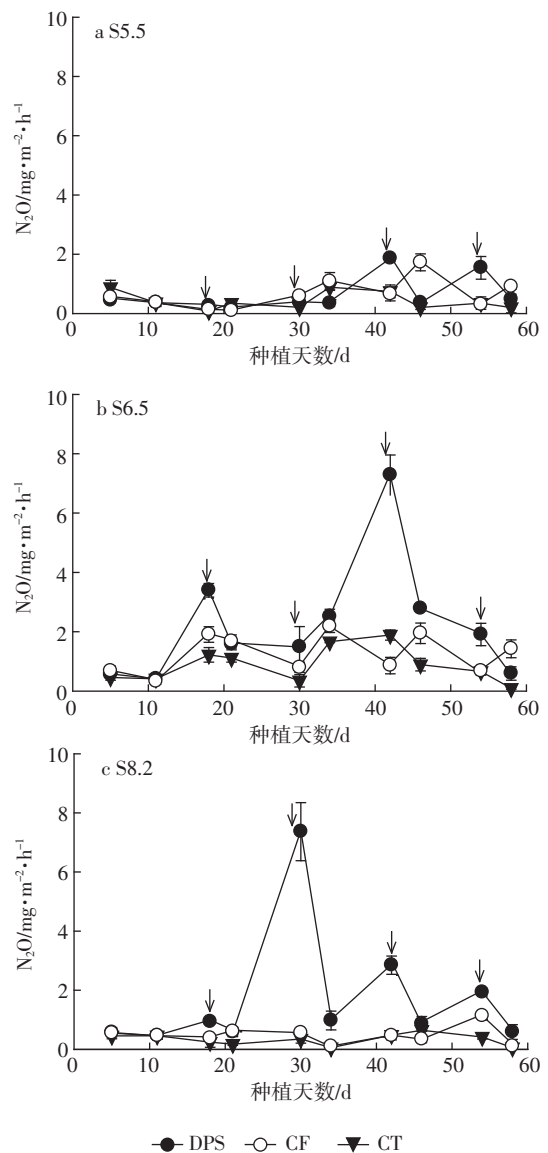


图 3 蔬菜生长期内 N₂O 排放通量的动态变化

Figure 3 Dynamics of N₂O emission during the growing period of crown daisy

3;图 3b,图 3c),整个生长期DPS处理中 N_2O 的平均排放速率均显著高于CF和CT处理,即 $DPS > CF > CT (P < 0.05)$,图 4e,图 4f)。S6.5和S8.2土壤追施沼液后,其 N_2O 的排放速率分别增加1.41、1.36 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,是追施化肥处理的2倍和10倍以上(图 5b)。

2.4 不同 pH 土壤追施沼液后 CH_4 和 N_2O 排放的响应

追施沼液后, CH_4 排放的增加量随着土壤 pH 的增加而增加(图 5a),即 $S8.2 > S6.5 > S5.5 (F = 30.41, P = 0.001)$;而 N_2O 排放的增加量与土壤 pH 不呈正相关(图 5b),表现为: $S5.5 > S8.2 > S6.5 (F = 98.37, P < 0.001)$ 。

与追施沼液不同,追施化肥后 CH_4 排放的增加量与土壤 pH 不呈正相关(图 5a),表现为: $S8.2 > S5.5 > S6.5 (F = 20.14, P < 0.01)$;而 N_2O 排放的增加量随着土壤 pH 的增加而降低(图 5b),即 $S5.5 > S6.5 > S8.2 (F = 11.28, P < 0.001)$ 。

3 讨论

作为肥料还田利用是目前沼液资源化的有效途径。然而,土壤理化性质的差异会造成沼液农田回用后 CH_4 和 N_2O 排放的差异。土壤 CH_4 和 N_2O 的排放与土

表 3 4次追肥期间 CH_4 和 N_2O 的单因素重复测量方差分析

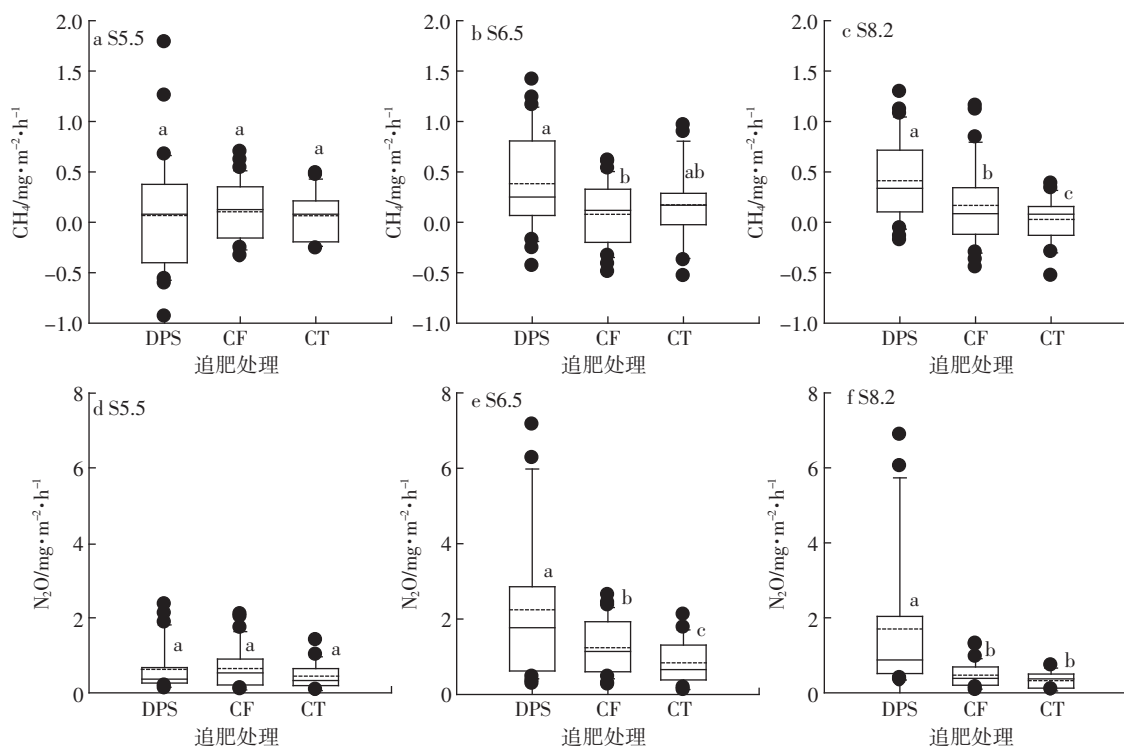
Table 3 Repeated measurement analysis of CH_4 and N_2O emissions between treatments during growing period of crown daisy

追肥时期		S5.5		S6.5		S8.2	
		F	P	F	P	F	P
CH_4	I_1	28.59	0.002	0.43	0.673	10.91	0.015
	I_2	2.89	0.147	19.63	0.039	16.29	0.006
	I_3	10.80	0.015	9.33	0.021	46.99	0.001
	I_4	4.03	0.091	10.49	0.016	0.02	0.978
N_2O	I_1	2.39	0.187	10.65	0.016	11.89	0.013
	I_2	2.37	0.189	3.25	0.124	99.58	<0.001
	I_3	7.27	0.033	73.29	<0.001	103.05	<0.001
	I_4	5.13	0.062	17.14	0.006	17.3	0.006

注:I_1~I_4 分别代表第1次至第4次追肥。

壤中速效碳氮及传输过程密切相关,而土壤性状和微生物群落又是影响碳、氮可利用性的重要因子^[13-14]。本试验中,各处理的土壤温度、水分条件相差不大,可以忽略由温度和水分造成的气体排放间的差异。pH 对施用沼液后土壤 CH_4 和 N_2O 的排放有显著的影响。

菜地土壤追施猪粪沼液后, CH_4 和 N_2O 排放速率增加,特别是在 S6.5 和 S8.2 土壤中,二者增幅均显著高于施用化肥的处理。

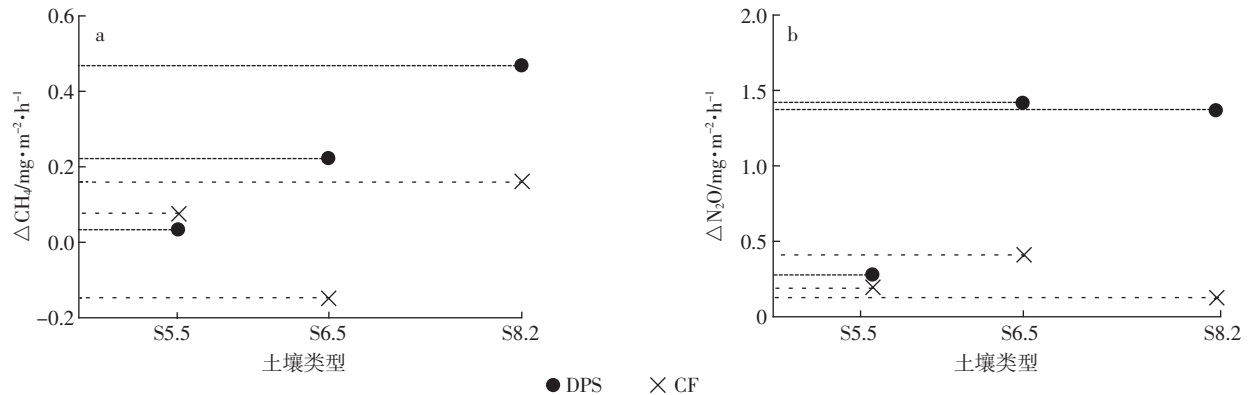


DPS、CF 和 CT 分别表示追施沼液、化肥和对照处理;虚线、黑线和黑点分布代表平均值、中值和极端值;

不同小写字母表示不同追肥间的差异显著($P < 0.05$)

图 4 蔬菜生长期不同 pH 土壤 CH_4 和 N_2O 平均排放速率

Figure 4 CH_4 and N_2O emissions between treatments during the growing period of crown daisy



DPS 和 CF 分别表示追施沼液和化肥的处理;△为施用沼液或化肥处理与对照的差值

图 5 不同 pH 土壤追肥后 CH₄(a)和 N₂O(b)的变化量

Figure 5 Differences of CH₄ and N₂O emission rates between topdressing treatments and control

CH₄ 排放增加的主要原因可能是:(1)沼液中含有大量的碳源,为与 CH₄ 排放相关的土壤微生物提供能量和底物;(2)沼液对土壤理化性状有所改善,有利于相关微生物的生长与活性^[15];(3)沼液中含有一定量的重金属,如 Mn、Fe、Co 等与产甲烷和甲烷氧化菌关系密切,并能够改变土壤的氧化还原电位^[13-14];(4)沼液中的 NH₄⁺-N 对 CH₄ 的氧化有抑制作用^[16],从而增加 CH₄ 的排放。

N₂O 排放增加的主要原因可能是:(1)沼液中含有大量的碳源,为硝化和反硝化细菌提供能量和底物^[17-18];(2)沼液中含有大量的 NH₄⁺-N^[19],有利于硝化作用的发生^[20-22]。

尽管供试的菜地土壤施用沼液后 CH₄ 和 N₂O 排放速率均有增加,但是在不同土壤 pH 条件下,二者的排放动态和增幅表现出了明显的差异。土壤 pH 较低的土壤(S5.5 和 S6.5)在作物生长前期追施沼液后,CH₄ 表现为负排放,随后逐渐表现为正排放;而 pH 较高的土壤(S8.2)在追施沼液后,CH₄ 始终为正排放。追施沼液后,整个生长季内的 CH₄ 排放总体上表现出随土壤 pH 值的增加而增加,即 S8.2>S6.5>S5.5。造成这一现象的主要原因是:土壤排放或吸收(负排放)CH₄ 与土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌的活动密切相关。甲烷产生需要极端还原条件、充足的底物供应和产甲烷菌的生长环境。尽管试验中 S5.5 和 S6.5 土壤的 SOC 高于 S8.2,但是 pH 低于产甲烷菌的最佳 pH 范围(6.9~7.2)^[23]。加上良好的通气条件,极易发生甲烷氧化菌氧化 CH₄ 的过程^[16,24]。此外,沼液中的 Mn 与甲烷氧化菌显著正相关^[25],施用后也可能增加甲烷氧化菌对 CH₄ 的转化。因此,在 S5.5 和 S6.5 土壤追施沼液前期,CH₄ 表现为负排放。S8.2 土壤 SOC 含量较低,其 pH 也并

非产甲烷菌的最佳 pH 范围,但是 CH₄ 排放量却最高,这是否由于甲烷氧化菌的活性受更大程度的抑制,还需进一步研究。

追施沼液后 N₂O 的排放趋势为 S6.5>S8.2>S5.5 ($F=98.37, P<0.001$),并未表现出随着土壤 pH 的降低而增加,这与其他研究结果有差异^[26]。S5.5 土壤仅在第三次施沼液后,其 N₂O 瞬时排放速率显著高于 CF 和 CT 处理,整个生长期土壤平均 N₂O 排放速率在各追肥处理间无显著差异。而 S6.5 和 S8.2 土壤追施沼液后,N₂O 排放速率显著增加,整个生长期 DPS 处理中 N₂O 的平均排放速率均显著高于 CF 和 CT 处理。N₂O 主要来源于微生物的硝化和反硝化过程^[27],局部的 O₂ 压力、氮素形态(如 NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺)和速效碳含量是控制这一过程的主要因子^[11],pH 通过直接或间接地影响这些因子来影响硝化和反硝化作用^[28]。pH 低会抑制分解有机质的细菌生长,从而降低硝化和反硝化微生物生活的底物数量^[11],S5.5 土壤 N₂O 的形成可能主要通过化学反硝化作用。由于沼液自身和土壤中 NO₃⁻-N 含量均较低^[19],施用沼液后可能造成 S5.5 土壤 NO₂ 排放量最低。沼液中 70%以上的氮以 NH₄⁺-N 形式存在^[19],因此施用沼液后硝化作用对 NO₂ 的形成起着重要的作用。S8.2 土壤 pH 过高会抑制硝化作用^[11,28],主要是脲酶活性被抑制^[24,28],同时 NH₄⁺-N 更容易通过 NH₃ 挥发损失^[29],降低了底物数量。此外,S8.2 土壤的 TN 和 SOC 含量低于 S6.5。因此,S8.2 施用沼液后土壤 N₂O 排放略低于 S6.5 土壤。

选择合适的土壤施用对提高沼液的肥料利用率、降低环境污染具有重要的意义。从本研究的结果看,酸性土壤施用沼液后,CH₄ 和 N₂O 的排放量显著低于微酸性和碱性土壤。沼液在碱性土壤中施用也会增加

NH_3 的排放,降低沼液的肥料利用效率,因此不推荐在碱性土壤中施用。本研究所选蔬菜仅为叶菜类,生长周期较短,且试验中没有定量测定沼液施用后 NO 和 N_2 的排放量,而这两者在硝化和反硝化过程中也可能大量生成。因此,在今后的研究中需要进一步补充和完善。

4 结论

不同 pH 菜地土壤追施猪粪沼液后, CH_4 和 N_2O 排放速率和总量增加,特别是在 S6.5 和 S8.2 土壤中,二者增幅均显著高于施用化肥的处理。 CH_4 的排放特征为:土壤 pH 较低的土壤(S5.5 和 S6.5)在作物生长前期追施沼液后, CH_4 表现为负排放,随后逐渐表现为正排放;而 pH 较高的土壤(S8.2)在追施沼液后, CH_4 始终为正排放。 N_2O 的排放特征为:S5.5 土壤仅在第三次施沼液后,其 N_2O 瞬时排放速率显著高于 CF 和 CT 处理,而 S6.5 和 S8.2 土壤 N_2O 排放速率均显著增加,其平均排放速率显著高于 CF 和 CT 处理。追施沼液后,整个生长季内 CH_4 平均排放量在不同 pH 土壤间的变化趋势为 $\text{S8.2} > \text{S6.5} > \text{S5.5}$, N_2O 排放的变化趋势为 $\text{S6.5} > \text{S8.2} > \text{S5.5}$ 。考虑到沼液的肥料利用率及其环境效应,碱性土壤上不宜施用沼液。

参考文献:

- [1] Lu J B, Zhu L, Hu G L, et al. Integrating animal manure-based bioenergy production with invasive species control: A case study at Tongren Pig Farm in China[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2010, 34(6): 821–827.
- [2] 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.
- [3] Dambreville C, Morvan T, Germon J-C. N_2O emission in maize-crops fertilized with pig slurry, matured pig manure or ammonium nitrate in Brittany[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(1–3): 201–210.
- [4] Fangueiro D, Trindade, H, Senbayram M, et al. Cattle slurry treatment by screw-press separation and chemically enhanced settling: Effect on greenhouse gas and ammonia emissions after land spreading[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15): 7132–7142.
- [5] Zhao X, Min J, Wang S Q, et al. Further understanding of nitrous oxide emission from paddy fields under rice/wheat rotation in south China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 2011, 116(G2).
- [6] 黄红英, 曹金留, 常志州, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2353–2361.
HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, CHANG Zhi-zhou, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353–2361.
- [7] Huang H Y, Wu H S, Cao J L, et al. Elevated methane emission from paddy field by using anaerobic digestion slurry in Southeast China[J]. *GCB Bioenergy*, 2013, doi: 10. 1111/gcbb. 12088
- [8] Liou R, Huang S, Lin C. Methane emission from fields with differences in nitrogen fertilizers and rice varieties in Taiwan paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(2): 237–246.
- [9] Zou J W, Liu S W, Qin Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 516–522.
- [10] Curtin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(1): 57–64.
- [11] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, et al. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(5): 898–911.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Jiao Y, Huang Y, Zong L G, et al. Effects of copper concentration on methane emission from rice soils[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(2): 185–193.
- [14] Ali M A, Oh J H, Kim P J. Evaluation of silicate iron slag amendment on reducing methane emission from flood CT rice farming[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 128(1–2): 21–26.
- [15] Meijide A, Díez J A, Sanchez-Martin L, et al. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 383–394.
- [16] 张秀君. 微生物在温室气体排放与吸收中的多样性[J]. 沈阳大学学报, 2008, 20(4): 1–5.
ZHANG Xiu-jun. Microorganism diversity in productions and emissions of greenhouse gases[J]. *Journal of Shenyang University*, 2008, 20(4): 1–5.
- [17] Miller M N, Zebarth B J, Dandie C E, et al. Crop residue influence on denitrification, N_2O emissions and denitrifier community abundance in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(10): 2553–2562.
- [18] Ndour N Y B, Baudoin E, Guissé A, et al. Impact of irrigation water quality on soil nitrifying and total bacterial communities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(5): 797–803.
- [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, 2011, 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.
- [20] Müller C, Stevens R J, Laughlin R J. Evidence of carbon stimulated N transformations in grassland soil after slurry application[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2): 285–293.
- [21] Nielsen T H, Revsbech N P. Nitrification, denitrification, and N-liberation associated with two types of organic hot-spots in soil[J]. *Soil Bi-*

- ology & Biochemistry, 1998, 30(5):611-619.
- [22] Rodhe L, Pell M, Yamulki S. Nitrous oxide, methane and ammonia emissions following slurry spreading on grassland[J]. *Soil Use and Management*, 2006, 22(3), 229-237.
- [23] Garcia J L, Patel B K C, Ollivier B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archaea[J]. *Anaerobe*, 2000, 6(4):205-226.
- [24] Sorokin D, Tourova T, Schmid M C, et al. Isolation and properties of obligately chemolithoautotrophic and extremely alkali-tolerant ammonia-oxidizing bacteria from Mongolian soda lakes[J]. *Archives of Microbiology*, 2001, 176(3):170-177.
- [25] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1):25-50.
- [26] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 土壤酸化对温室气体排放影响的培养实验研究[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4):465-470.
- OUIYANG Xue-jun, ZHOU Guo-yi, HUANG Zhong-liang, et al. The incubation experiment studies on the influence of soil acidification on greenhouse gases emission[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4):465-470.
- [27] Mosier A R, Duxbury J M, Freney J R, et al. Nitrous oxide emissions from agricultural fields - Assessment, measurement and mitigation[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(1):95-108.
- [28] Silva C C, Guido M L, Ceballos J M, et al. Production of carbon dioxide and nitrous oxide in alkaline saline soil of Texcoco at different CT contents amended with urea: A laboratory study[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7):1813-1822.
- [29] 靳红梅, 常志州, 郭德杰, 等. 追施猪粪沼液对菜地氨挥发的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):98-105.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, GUO De-jie, et al. Effect of top-dressing with digested pig slurry on ammonia volatilization in vegetable fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):98-105.

欢迎订阅 2014 年《生态与农村环境学报》

《生态与农村环境学报》系环境保护部主管、环境保护部南京环境科学研究所主办的学术期刊,是中文核心期刊(GCJC)、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)中国权威学术期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),被中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)、中文社会科学引文索引(CSSCI)、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中国核心期刊(遴选)数据库、CA、CABI、BA、BP、BD、UPD、GeoBase、ZR、EM、Scopus、AGRIS、中国农业文摘、中国生物学文摘等国内外重要刊库收录。系全国优秀环境科技期刊,江苏省优秀期刊,中国期刊协会赠建全国百家期刊阅览室指定赠送期刊。

本刊宗旨:及时报道生态与农村环境保护领域研究的动态、理论、方法与成果等。

主要栏目:研究报告、研究简报、研究方法、专论与综述、学术讨论与建议等。

主要内容:(1)区域环境与发展,包括生态环境变化与全球环境影响、区域生态环境风险评价、环境规划与管理、区域生态经济与生态安全等;(2)自然保护与生态,包括自然资源保护与利用、生物多样性与外来物种入侵、转基因生物环境安全与监控、生态保护、生态工程与生态修复、有机农业与农业生态等;(3)污染控制与修复,包括污染控制原理与技术、土壤污染与修复、水环境污染与修复、农业废物综合利用与资源化、农用化学品(包括化学品)风险评价与监控等。

主要读者对象:从事生态学、环境科学、农学、林学、地学、资源科学等研究、教学、生产的科技人员,相关专业的高等院校师生以及各级决策与管理人员。

本刊为双月刊,逢单月 25 日出版, A4 开本, 每期 136 页, 每期定价 20.00 元, 全年定价 120.00 元, 公开发行, 国内邮发代号 28-114, 国内各地邮局均可订阅; 国外由中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)负责发行, 国外发行代号 Q5688。如漏订, 可向本刊编辑部补订。

编辑部地址:江苏省南京市蒋王庙街 8 号
电话:(025)85287036, 85287052, 85287053
网址: <http://www.ere.ac.cn>

邮政编码:210042
邮箱: ere@vip.163.com, bjb@nies.org