

双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响

杨燕, 尹子铭, 袁京, 罗一鸣, 李国学

引用本文:

杨燕, 尹子铭, 袁京, 等. 双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2439–2447.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0955>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428–2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 NH_3 和 H_2S 的减排效果

宋修超, 郭德杰, 成卫民, 罗佳, 徐焯红, 王光飞, 刘新红, 马艳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2014–2020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0221>

Fe_2O_3 对鸡粪堆肥过程中含硫臭气排放的影响

陈文旭, 李国学, 马若男, 刘燕, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2465–2471 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0857>

腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响

杨佳, 李国学, 马若男, 王国英, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2456–2464 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0859>

生物质炭对猪粪堆肥过程中氮素转化及温室气体排放的影响

付祥峰, 刘琪琪, 李恋卿, 潘根兴, 郑金伟, 张旭辉, 程琨

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1893–1900 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0182>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨燕, 尹子铭, 袁京, 等. 双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2439–2447.
YANG Y, YIN Z M, YUAN J, et al. Effects of dicyandiamide and hydroquinone on greenhouse gas emissions during composting[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(11): 2439–2447.



开放科学 OSID

双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响

杨燕, 尹子铭, 袁京, 罗一鸣, 李国学*

(中国农业大学资源与环境学院农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要:为实现畜禽粪便堆肥过程温室气体和NH₃的同步减排,在添加一定氢醌的基础上,探究双氰胺添加比例和添加时间对堆肥温室气体和NH₃排放的影响。以猪粪和玉米秸秆为堆肥原料,设置5个堆肥处理:对照处理,添加0.03%氢醌处理,在氢醌的基础上第19 d添加0.1%的双氰胺处理、第0 d添加0.2%的双氰胺处理和第0 d与19 d各添加0.1%的双氰胺处理。在60 L的发酵罐中进行40 d的堆肥试验。结果表明:添加干质量0.1%~0.2%的双氰胺和0.03%的氢醌并未对猪粪堆肥腐熟度造成影响;氢醌作为脲酶抑制剂对堆肥NH₃和温室气体排放影响较小,在此基础上添加双氰胺可减少8.88%~12.94%的NH₃排放、6.79%~13.55%的CH₄排放和24.71%~35.83%的N₂O排放,总温室效应可降低18.61%~19.97%。考虑到经济成本和减排效果,建议在堆肥降温期添加双氰胺。

关键词:堆肥;双氰胺;氢醌;温室气体;NH₃

中图分类号:S11.4;X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2439-09 doi:10.11654/jaes.2021-0955

Effects of dicyandiamide and hydroquinone on greenhouse gas emissions during composting

YANG Yan, YIN Ziming, YUAN Jing, LUO Yiming, LI Guoxue*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Dicyandiamide and hydroquinone have been widely used to improve crop yield and reduce nitrogen loss in farmland. With the aim of achieving simultaneous emission reduction of greenhouse gases and ammonia during manure composting, this study explored the effects of dicyandiamide with different addition ratios and addition times on greenhouse gas and ammonia emissions based on the addition of hydroquinone during composting. In this study, pig manure and corn straw were used as compost materials, and five composting treatments were carried out for 40 days in a 60 L composting vessel. The control check continued without any additives, the HD treatment condition was supplemented with only 0.03% dry weight hydroquinone, and the other three treatments involved the addition of hydroquinone, 0.1% dicyandiamide on the 19th day, 0.2% dicyandiamide on the 0th day, and 0.1% dicyandiamide on the 0th and the 19th days. The results showed that the addition of 0.1%~0.2% dicyandiamide and 0.03% hydroquinone had no substantial adverse effects on the composting process of pig manure and corn straw. Hydroquinone, as a urease inhibitor, had little effect on ammonia and greenhouse gas emissions, but adding dicyandiamide on the basis of hydroquinone addition reduced NH₃ emissions by 8.88%~12.94%, CH₄ emissions by 6.79%~13.55%, and N₂O emissions by 24.71%~35.83%; the total greenhouse effect could be reduced by 18.61%~19.97%. Considering the economic cost and emission reduction effect, it is suggested that dicyandiamide should be added during the composting cooling period.

Keywords: composting; dicyandiamide; hydroquinone; greenhouse gas; ammonia

收稿日期:2021-08-24 录用日期:2021-09-06

作者简介:杨燕(1998—),女,四川雅安人,硕士研究生,从事固体废物资源化利用研究。E-mail:1501536757@qq.com

*通信作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0316)

Project supported: Project for Science and Technology of Inner Mongolia Autonomous Region(2021GG0316)

我国每年畜禽粪便产量高达42亿t,但还田率低于50%,大量的畜禽粪便未经资源化处理,不仅导致大量养分流失,而且会造成严重环境污染^[1-2]。畜禽粪便中含有丰富的氮磷钾等营养元素,是重要养分资源。2017年,我国畜禽粪便中氮、磷养分含量分别达到我国氮肥、磷肥施用量的93.4%和71.6%^[3]。好氧堆肥是将畜禽粪便转化为有机肥料的绿色方法之一,因其操作便利、技术相对成熟和成本低廉等优点得到广泛应用^[4]。但由于堆肥过程存在氧气扩散不均、高温和高pH等特性,会产生大量NH₃和温室气体,对环境造成二次污染。堆肥过程中,有机氮通过氨化作用产生NH₃,且氨挥发是堆肥过程氮损失的主要途径,约占堆肥总氮的20%~60%^[5]。CH₄和N₂O不仅是重要的碳氮损失途径,而且是对温室效应贡献较大的温室气体,其100 a温室效应分别是CO₂的25倍和298倍^[6]。CH₄排放约占堆肥初始总碳的0.2%~3.2%,N₂O排放约占初始总氮的0.1%~4.2%^[7]。降低堆肥过程中的NH₃和温室气体排放,对于实现我国碳达峰、碳中和目标有重要意义。

堆肥过程中,主要通过调节物料性质、优化工艺参数以及添加外源添加剂等方式来进行污染气体减排。研究表明,化学添加剂如磷石膏、过磷酸钙等可以有效控制堆肥氮素损失和温室气体排放^[8-9],双氰胺(二氰二氨,C₂H₄N₄,缩写为DCD)和氢醌(对苯二酚,C₆H₆O₂,缩写为HQ)已广泛用于降低农田氮素损失和提升作物产量,而在堆肥系统中的使用较少。双氰胺作为一种硝化抑制剂,通过与亚硝化细菌呼吸酶中的巯基作用来抑制亚硝化细菌的生长繁殖,从而起到硝化抑制的作用^[10]。氢醌作为一种经济的脲酶抑制剂,通过与脲酶的巯基(-SH)发生作用,使其被氧化脱氢,形成S-S的胱氨酰,从而有效地抑制脲酶活性^[11-12]。研究表明,双氰胺的施用可使水稻增产10.0%、油菜增产22.8%~33.5%,氢醌的施用可使水稻增产5.0%、大豆增产4.9%、玉米增产9.3%、小麦增产11.0%,表明双氰胺和氢醌是农作物友好试剂^[13]。

双氰胺和氢醌具有农学效应的同时也具有较好的环境效应,施用于农田中均对温室气体有一定的减排效果。李香兰等^[14]在水稻种植中施入双氰胺,发现能同时减少5.2%的CH₄和30.3%的N₂O的排放。周礼恺等^[11]研究表明,在盆栽试验中施用氢醌可减少4.7%~9.8%的氨挥发。研究表明双氰胺和氢醌在固氮减排上有一定效果,但硝化抑制剂单独施用有增加氨挥发的可能^[13],目前较多研究通过联合施用双氰胺

和氢醌对农田温室气体和NH₃进行减排。XU等^[15]的研究表明,在水稻田土壤中联合施用双氰胺和氢醌后,CH₄和N₂O分别降低51%和47%。BOECKX等^[16]在土壤中联合施用双氰胺和氢醌可使CH₄和N₂O的排放率分别降低58%和62%。JIANG等^[17]在猪粪堆肥中联合添加硝化抑制剂和磷酸镁盐可减少45%的NH₃和70%的N₂O排放。

双氰胺和氢醌目前主要用于农田系统,在堆肥系统中联合添加二者的研究较少。高温条件会加速硝化抑制剂的降解,堆肥过程中硝化抑制剂的添加时间和添加量直接影响减排效果,但针对硝化抑制剂在堆肥过程中适宜的添加时间和添加量还未有系统报道。因此,本论文在添加一定氢醌的基础上,探究双氰胺不同的添加比例和添加时间对猪粪堆肥过程中的温室气体和NH₃排放的影响,实现堆肥过程中CH₄、N₂O和NH₃的同步减排,旨在为畜禽粪便堆肥过程中的温室气体减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验原料为新鲜猪粪和玉米秸秆,猪粪取自北京市海淀区苏家坨养猪场,玉米秸秆取自北京市大兴区,经自然风干后粉碎成2~5 cm的小段。猪粪和秸秆以鲜质量6:1均匀混合,基本理化性质见表1,试验使用的氢醌和双氰胺为实验室分析纯化学试剂。

表1 堆肥原料基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of raw materials of composting

原料 Raw material	总有机碳 ^b Total organic carbon/(g·kg ⁻¹)	总氮 ^b Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	含水率 ^a Moisture content/%	C/N ^b
猪粪 Pig manure	365.6	27.8	77.1	13.2
秸秆 Corn stalk	413.8	9.6	8.9	43.1

注:a,基于湿基;b,基于干基。

Note:a, wet weight basis;b, dry weight basis.

1.2 试验设计

试验以添加0.03%(以干质量计)的氢醌为基础,添加比例为0.1%~0.2%的双氰胺,共设5个处理。双氰胺在堆肥高温条件(平均温度65℃)下的降解半衰期可能小于18 d。为减少堆肥高温对双氰胺降解的促进作用,将双氰胺添加时间选择在堆肥降温期(>40℃)。各处理添加材料比例与添加时间节点见表2。试验在60 L发酵罐中进行,采用机械强制间歇

式通风,通风速率设定为 $0.36\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,每通风20 min 暂停40 min。本次试验共堆置40 d,分别在第0、6、12、19、26、33、40 d采集固体样品,每份固体样品质量约500 g,分为两部分保存。新鲜样品用于测定pH值、电导率(Electric conductivity, EC)、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、发芽率指数(Germination index, GI)等指标,4℃冷藏储存备用;另一部分自然风干,粉碎后过0.5 mm筛,用于测定总有机碳(Total organic carbon, TOC)和总氮(Total nitrogen, TN)。

表2 试验设计(%)

Table 2 Design of the orthogonal experiment(%)

处理 Treatment	双氰胺 ^a Dicyandiamide		氢醌 ^a Hydroquinone
	0 d	19 d	0 d
对照(CK)	—	—	—
氢醌(H)	—	—	0.03
氢醌+双氰胺(HD-1)	—	0.1	0.03
氢醌+双氰胺(HD-2)	0.2	—	0.03
氢醌+双氰胺(HD-3)	0.1	0.1	0.03

注:a,基于干基。

Note:a, dry weight basis.

1.3 试验方法

堆肥温度由罐体上温度传感器测定,每0.5 h自动记录堆体中心温度,氧气采用泵吸式气体检测仪(英国 Geotech, BM2K-E000)进行测定。EC和pH用10:1(V:m)的水浸提鲜液,经MP521型电导仪和pH计测定, E_4/E_6 用水浸提鲜液,使用紫外分光光度计在波长为465 nm和665 nm处测定。GI测定选用小白菜种子,将水浸提液5 mL倒入垫有滤纸的培养皿中,置于 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 培养箱中培养48 h后测定发芽率和根长,并根据REN等^[18]的公式计算。将 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液与鲜样以10:1(V:m)混合后振荡30 min,静置过滤后使用流动分析仪(Auto Analyzer 3, Seal, 德国)测定 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量。TOC参照农业行业标准《有机肥料》(NY 525—2021)中的标准方法测定;TN采用元素分析仪(Elementar Analysensysteme, Hanau, 德国)测定。

NH_3 测定:采用质量分数为2%的硼酸进行吸收,后用标准浓度的稀硫酸滴定。 N_2O 和 CH_4 测定:首先使用带三相阀门的注射器采集,后用SP-3420A型气相色谱(北京北分瑞利)测定。堆肥过程中的碳氮损失和 NH_3 和 N_2O 排放占总氮损失比例及 CH_4 排放占总碳损失比例计算均参照陈是吏等^[19]的公式计算。

1.4 统计分析

使用Origin 2018做图,使用SAS 8.2(SAS Insti-

tute, Cary, NC, USA)进行最小显著差异法(LSD)分析。

2 结果与讨论

2.1 理化和腐熟度指标

堆肥过程中环境温度维持在 $20.19\sim 29.12^\circ\text{C}$,堆肥各处理温度变化如图1a所示。堆肥升温期和高温期,各处理温度变化相近,最高温度均出现在7 d左右($72.44\sim 73.38^\circ\text{C}$),高温期均超过20 d,满足《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012)中堆肥温度应在 $50\sim 55^\circ\text{C}$ 持续5~7 d以上的要求,表明加入氢醌和双氰胺未对堆肥温度和有机物降解造成不利影响,与姜继韶等^[20]对污泥堆肥的研究结果不同。在堆肥降温期和腐熟期,各处理温度呈现显著差异($P<0.001$),且与堆体中氧气含量呈显著负相关关系($r=-0.874\sim -0.937$, $P<0.001$)。堆肥过程中各处理氧气含量变化趋势一致(图1b),即先下降后逐渐上升至接近空气含量。各处理氧气消耗率在堆肥升温期均大于50% ($52.19\%\sim 96.10\%$),随后耗氧率呈逐渐降低趋势,在堆肥第19 d下降到40%以下,至堆肥结束时,各处理氧气消耗率维持在2%~9%左右。堆肥过程中,pH呈现先增加后降低再增加的趋势(图1c)。在堆肥初期,有机氮的氨化作用产生大量 NH_4^+-N ,使得pH上升^[21];在堆肥第12 d时, NH_3 大量挥发,导致pH下降;在堆肥结束时,各处理pH均在腐熟标准范围内($8.05\sim 8.27$)。

EC值可反映堆体中的盐度,从而判断其盐分含量是否会对植物造成不利影响^[22]。整个堆肥过程中,各处理EC值呈现逐渐下降后趋于稳定趋势(图1d)。氢醌和双氰胺添加导致4个试验组的初始EC均高于对照组。堆肥初期,各处理EC值下降,其原因为 NH_3 的挥发、矿物盐的沉淀和大分子物质的生产^[23]。堆肥第19 d时,HD-1和HD-3处理均加入了0.1%的双氰胺,导致这两个处理在此之后EC上升。堆肥腐熟期,各处理EC值略微上升,可能是由于随着有机质的降解,堆体中盐离子发生富集浓缩。堆肥结束时,各处理EC值均小于 $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($1.67\sim 1.95\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$),不会对作物造成盐害^[24]。

GI随着毒性物质分解而增加,可表征植物毒性特征,来评估堆肥产品腐熟度^[25]。在堆肥过程中,所有处理GI值均呈现上升趋势(图1e)。堆肥结束时,所有处理GI值均满足2021年发布的农业行业标准《有机肥料》(NY 525—2021)对GI的要求($>70\%$),其中HD-2处理GI值最高(135.45%)。HD-1处理GI值

(83.12%)低于对照组,可能与其较高的EC值和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量有关。 E_4/E_6 可快速评估堆肥腐熟度,表征腐植酸的质量和芳构化程度,通常随分子量和腐植酸缩合度的增加而降低^[26]。各处理组 E_4/E_6 略低于对照组(图1f, $P>0.1$),表明添加氢醌和双氰胺可在一定程度上提高堆肥腐殖化程度。

2.2 碳、氮含量变化

各处理的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈现相同的变化趋势(图2a),随堆肥过程先升高后降低。堆肥高温期,HD-2和HD-3两个处理 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量最高,原因为堆肥初期硝化抑制剂的添加,双氰胺与亚硝化细菌呼吸酶中的硫

基作用而产生硝化抑制作用^[27]。在堆肥降温期,硝化抑制作用的减弱,猜测原因为双氰胺在高温期会受高温作用而分解。堆肥第19 d时,HD-1和HD-3处理均加入了0.1%(干物质)的双氰胺,导致这两个处理在腐熟期 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量上升,到堆肥结束时显著高于其他处理($P<0.05$)。各处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 整体上呈现略微下降趋势(图2b),差异不显著($P>0.05$)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是堆体中主要的无机态氮,各试验组中均加入了脲酶抑制剂,抑制 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的形成,这使得 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在堆肥高温期被微生物大量利用,因此各试验组 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均低于对照组。在第19 d,HD-1和HD-3处理均加入了

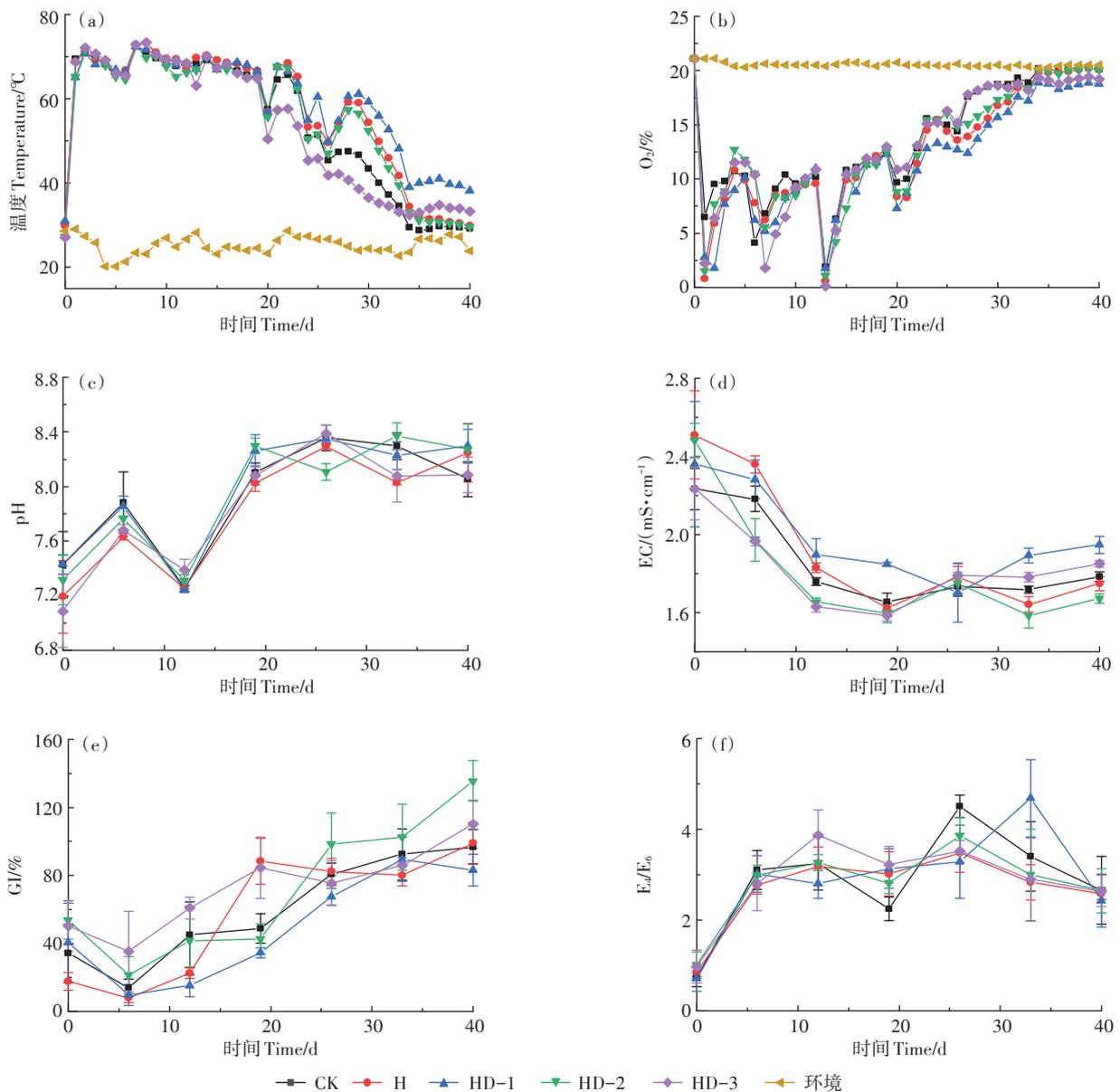


图1 堆肥过程理化性质变化

Figure 1 Changes of physico chemical properties during composting

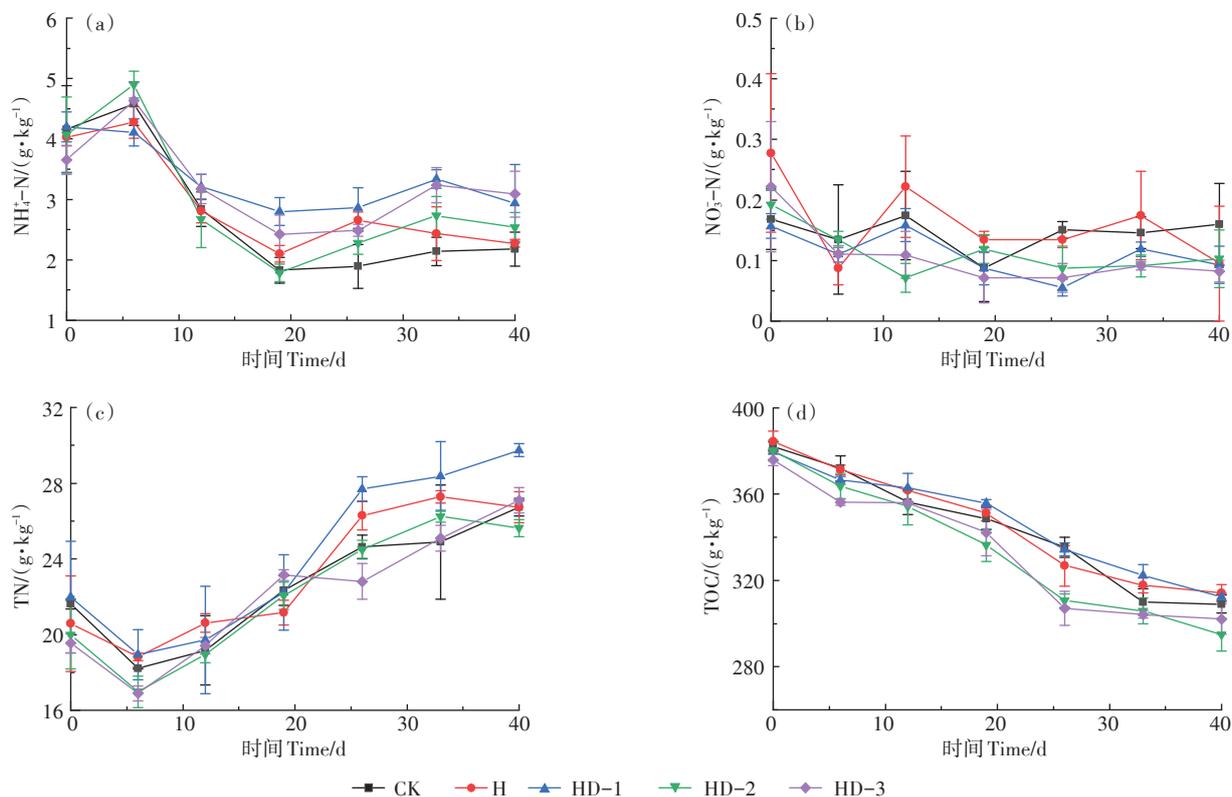


图2 堆肥碳氮含量的变化

Figure 2 Changes in carbon and nitrogen content during composting

0.1% (干物质) 的硝化抑制剂双氰胺, 导致其 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 进一步降低且维持在较低水平。

各处理 TN 整体呈现上升趋势 (图 2c), 含量从初始的 $19.54 \sim 21.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $25.63 \sim 29.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$)。堆肥初期 TN 呈现下降趋势, 这是由于有机氮的分解和 NH_3 排放所造成的氮损失。随着堆肥进行, 有机物快速分解、堆肥物质减少使得 TN 含量被富集, 在 YANG 等^[28] 的试验中展现出相同的规律。随着堆肥的进程, TOC 呈现下降趋势 (图 2d), 堆肥初始时各处理 TOC 含量为 $375.89 \sim 384.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于堆肥结束时 $294.86 \sim 314.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.3 NH_3 、 CH_4 和 N_2O 排放

NH_3 在堆肥过程中的排放速率和累积排放量如图 3a~图 3b 所示, NH_3 的排放峰值均集中在高温期的每次翻堆后, CK、H、HD-1、HD-2 和 HD-3 处理的排放峰值分别为 0.84 、 0.76 、 0.62 、 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 累积排放量分别为 5.95 、 5.85 、 5.18 、 $5.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见在堆肥过程中添加氢醌和双氰胺可显著减少 NH_3 的排放 ($P < 0.001$), H、HD-1、HD-2 和 HD-3 处理较 CK 处理的 NH_3 排放减少了 1.70%、12.94%、8.88% 和 9.37%。脲酶抑制剂氢醌的

添加会抑制堆肥中脲酶的活性, 从而减少 NH_3 的产生, 在高温期后添加硝化抑制剂有更好的 NH_3 减排效果。

堆肥过程中 N_2O 的排放速率和累积排放量如图 3c~图 3d 所示, N_2O 主要来源于有氧情况下 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的硝化作用和缺氧条件下 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的反硝化作用^[29-30]。 N_2O 的排放峰值主要集中在堆肥初期和腐熟期, CK、H、HD-1、HD-2 和 HD-3 处理的排放峰值分别为 0.059 、 0.061 、 0.052 、 $0.060 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.055 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 排放峰值均在堆肥第 2 d 前产生, 这是由于自养型硝化细菌在堆肥高温期活性极低, 堆肥初期 N_2O 排放主要是由于反硝化作用, 物料中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 进一步发生反硝化, 生成 N_2O , 这与堆肥初期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量降低的现象是一致的^[31]。堆肥结束时, CK、H、HD-1、HD-2 和 HD-3 处理的 N_2O -N 累积排放量分别为 0.37 、 0.38 、 0.24 、 $0.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加双氰胺和氢醌可显著减少 N_2O 的排放 ($P < 0.001$), HD-1、HD-2 和 HD-3 处理较 CK 处理的 N_2O 排放减少了 35.83%、24.71% 和 31.79%。JIANG 等^[32] 和 THOMPSON 等^[33] 的研究表明 N_2O 主要在堆肥腐熟期产生, 而 HD-1 和 HD-3 处理在第 19 d 加入了 0.1% 的双氰胺, 双氰胺通

过和亚硝化细菌呼吸酶中的巯基作用而产生硝化抑制作用,从而影响 NH_4^+ 向 NO_2^- 的转化,减少 N_2O 的排放^[10]。HD-2处理在堆肥初期加入了双氰胺,但双氰胺在高温下易分解,导致HD-2处理在腐熟期 N_2O 排放有所反弹。HD处理的 N_2O 累积排放量相较于CK处理增加了4.15%,表明在堆肥中单独使用氢醌会增加 N_2O 的排放,猜测原因为其堆肥后期 NO_3^- -N含量较高,发生反硝化作用导致 N_2O 的大量排放。

堆肥过程中有机质被微生物快速分解,氧气扩散距离有限,局部厌氧状况普遍存在,从而导致 CH_4 产生和排放^[34]。 CH_4 在堆肥过程中的排放速率和累积排

放量见图3e~图3f,各处理排放峰值集中在高温期,与AWASTHI等^[35]的研究结果一致。CK、H、HD-1、HD-2和HD-3处理的 CH_4 排放峰值分别为0.73、0.62、0.59、0.53 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,排放峰值均在堆肥第5 d到第7 d产生,这是由于在高温期氧气利用率高、氧气含量低,易形成局部缺氧环境。统计分析结果表明, CH_4 的排放速率与氧气浓度呈现负相关关系,相关性为-0.465~-0.617 ($P<0.005$),与温度呈现显著正相关关系,相关性为0.512~0.619 ($P<0.001$)。CK、H、HD-1、HD-2和HD-3处理的 CH_4 累积排放量分别为6.21、5.93、5.79、5.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和5.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, H、

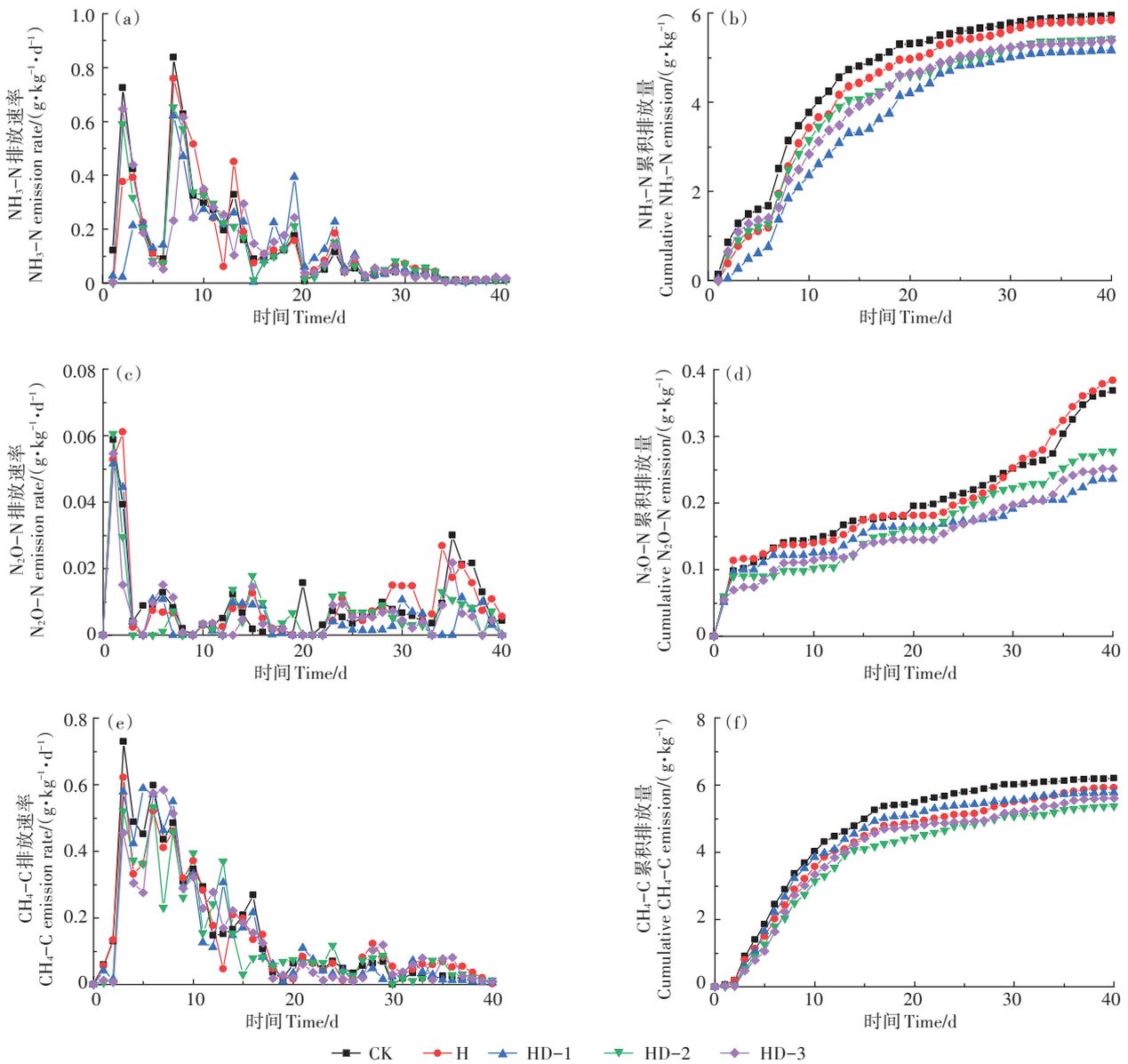


图3 CH_4 、 N_2O 和 NH_3 排放速率及累积排放

Figure 3 The CH_4 , N_2O , and NH_3 emission rate and cumulative emission during composting

HD-1、HD-2和HD-3处理的CH₄排放降低了4.51%、6.76%、13.55%和9.60%,其减排机理为双氰胺可抑制产甲烷菌活性来减少CH₄的产生,而氢醌可抑制以醋酸盐为底物的产甲烷菌发酵过程来降低CH₄排放^[36]。可见硝化抑制剂和脲酶抑制剂联合使用可显著降低CH₄累积排放量($P<0.001$),其中HD-2处理减排效果最佳。

2.4 总碳、氮损失与物料平衡

堆肥过程中物料总有机碳和总氮变化规律及温室效应分析如表3所示。至堆肥结束时,各处理总有机碳质量分数从堆肥起始的375.89~384.58 g·kg⁻¹下降到294.86~314.89 g·kg⁻¹;总氮质量分数从堆肥起始的19.54~21.99 g·kg⁻¹上升到25.63~29.74 g·kg⁻¹。堆肥过程中没有渗滤液产生,碳氮元素主要以气体形式损失。各处理碳损失占初始总有机碳的47.61%~54.59%,其中主要以CO₂-C形式损失(34.76%~36.88%),以CH₄-C形式损失的较少,只占初始总有机碳的1.39%~1.61%,H、HD-1、HD-2、HD-3相较于CK总有机碳损失分别增加5.26、6.98、4.44、2.45个百分点。氮损失占初始总氮的31.83%~35.84%,主要以NH₃-N的形式损失(23.55%~27.05%),以N₂O形式损失的氮较少(1.08%~1.75%)。双氰胺和氢醌共同添加可显著减少以NH₃-N和N₂O形式的氮损失。

堆肥过程中的温室气体主要包括CH₄、N₂O和CO₂,但堆肥过程中的CO₂来源于微生物呼吸作用,属于生物过程,因此可不计入总温室效应的计算,而CH₄和N₂O都是对温室效应贡献较大的温室气体。HD-1、HD-2和HD-3处理下,CH₄产生的温室效应较CK处理分别减少了35.85%、24.60%和31.81%,N₂O产生的温室效应减少了6.74%、13.47%和9.66%,表

明双氰胺和氢醌共同使用可减少堆肥过程中的温室气体排放当量,总温室气体排放当量减少了23.3~25.0 kg·t⁻¹。氢醌单独使用对温室气体减排效果不显著(减排率为0.56%),而在氢醌的基础上添加双氰胺对温室气体减排效果显著提高(18.61%~19.97%),双氰胺的添加量(基于干质量0.1%~0.2%)和添加时间(第0 d和第19 d)对减排效果影响不显著。

3 结论

(1)在间歇式强制通风堆肥系统中,添加初始物料干质量0.1%~0.2%的双氰胺和0.03%的氢醌不会影响猪粪堆肥腐熟过程。堆肥后各处理产品均达到无害化和腐熟度要求,所有处理高温期时间达到20 d以上,最终产品的GI值为83.12%~135.45%。

(2)氢醌作为脲酶抑制剂对堆肥NH₃和温室气体排放影响较小,在其基础上添加双氰胺可减少8.88%~12.94%的NH₃排放、6.79%~13.55%的CH₄排放和24.71%~35.83%的N₂O排放,总温室效应可降低18.61%~19.97%。

(3)双氰胺在不同添加量(基于干质量0.1%~0.2%)和添加时间(第0 d和第19 d)的情况下,3个共同添加双氰胺和氢醌的处理对温室气体减排效果差异不显著,综合考虑经济成本和减排效果,建议双氰胺在堆肥降温期添加,且添加量为干基质量的0.1%。

参考文献:

- [1] 徐长春. 畜禽粪便的危害及无公害处理的现状[J]. 新农业, 2020(13):56. XU C C. The harm of livestock manure and the present situation of pollution-free treatment[J]. *New Agricultural*, 2020(13):56.

表3 碳、氮平衡及温室效应分析

Table 3 Mass balance of carbon, nitrogen and total global warming potential during composting

处理 Treatment	碳素平衡 C balance /%			氮素平衡 N balance /%			温室气体排放当量 Greenhouse gas equivalent/(kg·t ⁻¹)		
	CH ₄ -C	CO ₂ -C	总损失 Total loss	NH ₃ -N	N ₂ O-N	总损失 Total loss	CH ₄	N ₂ O	总温室气体 Total greenhouse gas
CK	1.61	36.79	47.61	27.05	1.68	33.07	56.9	68.3	125.2
H	1.54	34.76	52.87	26.59	1.75	35.45	59.3	65.2	124.5
HD-1	1.50	34.86	54.59	23.55	1.08	33.52	36.5	63.7	100.2
HD-2	1.39	35.00	52.05	24.65	1.26	35.84	42.9	59.1	101.9
HD-3	1.46	36.88	50.06	24.52	1.14	31.83	38.8	61.7	100.6

注:碳、氮素平衡分别为碳、氮损失占初始总有机碳、总氮的百分比;温室气体排放当量值以物料的干基计算;N₂O和CH₄对温室效应的贡献率分别为CO₂的298倍和25倍。

Note: The balance of carbon and nitrogen is the percentage of carbon and nitrogen loss in the initial total organic carbon and nitrogen, respectively; the greenhouse gas emission equivalent value is calculated on the dry basis of the material, and the global warming potentials of N₂O and CH₄ are 298 and 25 times that of CO₂, respectively.

- [2] 马常宝, 史梦雅. 我国主要畜禽粪便资源利用现状与分析研究[J]. 中国农技推广, 2016, 32(11): 7-11. MA C B, SHI M Y. Utilization status and analysis of main livestock and poultry manure resources in China[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2016, 32(11): 7-11.
- [3] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1168-1176. WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176.
- [4] 王义祥, 叶菁, 林怡, 等. 花生壳生物炭用量对猪粪堆肥温室气体和NH₃排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 114-125. WANG Y X, YE Q, LIN Y, et al. Effect of peanut shell biochar on greenhouse gas and NH₃ emission during swine manure composting[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 114-125.
- [5] PETERSEN S O, SOMMER S G. Ammonia and nitrous oxide interactions: Roles of manure organic matter management[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166/167: 503-513.
- [6] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers[M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 18.
- [7] CAO Y, WANG X, BAI Z, et al. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 626-635.
- [8] YUAN J, LI Y, CHEN S, et al. Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 368-376.
- [9] WU J, HE S, LIANG Y, et al. Effect of phosphate additive on the nitrogen transformation during pig manure composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(21): 17760-17768.
- [10] ZOU Y, HU Z, ZHANG J, et al. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 210: 81-87.
- [11] 周礼恺, 赵晓燕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂氢醌对土壤尿素氮转化的影响[J]. 应用生态学报, 1992, 3(1): 36-41. ZHOU L K, ZHAO X Y, LI R H, et al. Effect of urease inhibitor hydroquinone on urea-N transformation in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(1): 36-41.
- [12] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1614-1621. WU Z J, SHI Y L, LI D P, et al. The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1614-1621.
- [13] 田发祥, 纪雄辉, 官迪, 等. 氮肥增效剂的研究进展[J]. 杂交水稻, 2020, 35(5): 7-13. TIAN F X, JI X H, GUAN D, et al. Advances of research on nitrogen inhibitors[J]. *Hybrid Rice*, 2020, 35(5): 7-13.
- [14] 李香兰, 马静, 徐华, 等. DCD不同施用时间对水稻生长期CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3675-3681. LI X L, MA J, XU H, et al. Effects of different application time of DCD on CH₄ and N₂O emissions during rice growth period[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3675-3681.
- [15] XU X K, BOECKX P, VAN CLEEMPUT O, et al. Urease and nitrification inhibitors to reduce emissions of CH₄ and N₂O in rice production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(1/2): 203-211.
- [16] BOECKX P, XU X, VAN CLEEMPUT O. Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72(1): 41-49.
- [17] JIANG T, MA X, TANG Q, et al. Combined use of nitrification inhibitor and struvite crystallization to reduce the NH₃ and N₂O emissions during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 210-218.
- [18] REN L, SCHUCHARDT F, SHEN Y, et al. Impact of struvite crystallization on nitrogen losses during composting of pig manure and corn-stalk[J]. *Waste Management*, 2010, 30(5): 885-892.
- [19] 陈是吏, 袁京, 李国学, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及NH₃排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 199-206. CHEN S L, YUAN J, LI G X, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and NH₃ emissions during sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6): 199-206.
- [20] 姜继韶, 雷建森, 王洋, 等. 双氰胺对污泥堆肥过程中酶活性和细菌群落演变的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1478-1486. JIANG J S, LEI J S, WANG Y, et al. Effects of dicyandiamide on enzyme activity and the structure of bacterial community during sewage sludge composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1478-1486.
- [21] GUO H, GU J, WANG X, et al. Microbial driven reduction of N₂O and NH₃ emissions during composting: Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 390: 121292.
- [22] HUANG G F, WONG J W C, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. *Waste Management*, 2004, 24(8): 805-813.
- [23] WANG Q, WANG Z, AWASTHI M K, et al. Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 297-304.
- [24] JIANG Y, JU M, LI W, et al. Rapid production of organic fertilizer by dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) of food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 197: 7-14.
- [25] LUO Y, LIANG J, ZENG G, et al. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects[J]. *Waste Management*, 2018, 71: 109-114.
- [26] YUAN J, CHADWICK D, ZHANG D, et al. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56: 403-410.
- [27] ZACHERL B, AMBERGER A. Effect of the nitrification inhibitors dicyandiamide, nitrapyrin and thiourea on *Nitrosomonas europaea*[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 22(1): 37-44.

- [28] YANG Y, MUKESH K A, WEI D, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122435.
- [29] ROBERTSON L A, KUENEN J G. Aerobic denitrification: Old wine in new bottles?[J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1984, 50 (5/6) : 525-544.
- [30] ABD E K N, PAUL R, JEAN-MARIE P, et al. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98 (14) : 2619-2628.
- [31] FUKUMOTO Y, OSADA T, HANAJIMA D, et al. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 109-114.
- [32] JIANG T, MA X, YANG J, et al. Effect of different struvite crystallization methods on gaseous emission and the comprehensive comparison during the composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 219-226.
- [33] THOMPSON A G, WAGNER-RIDDLE C, FLEMING R. Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 91(1/2/3): 87-104.
- [34] WOLTER M, PRAYITNO S, SCHUCHARDT F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 235-244.
- [35] AWASTHI M K, DUAN Y, AWASTHI S K, et al. Effect of biochar and bacterial inoculum additions on cow dung composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122407.
- [36] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 917-924. LI X L, XU H, CAI Z C. Effect of combined use of hydroquinone and dicyandiamide on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 917-924.

2021年12月5日 世界土壤日

防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力



《农业环境科学学报》编辑部
《农业资源与环境学报》编辑部
中国土壤学会科普工作委员会