

有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究

薛文涛, 孙昊, 孙钦平, 张玲, 吴荣, 田野, 陈益山, 邹国元, 刘善江

引用本文:

薛文涛, 孙昊, 孙钦平, 张玲, 吴荣, 田野, 陈益山, 邹国元, 刘善江. 有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(5): 1086–1203.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1203>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机酸对猪粪中重金属的浸提

杜丽琼, 刘东方, 黄文力, 魏孝承, 杨丹

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2121–2128 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0545>

外源添加磷石膏对堆肥碳组分及腐殖质品质的影响

刘媛媛, 徐智, 陈卓君, 汤利

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2483–2490 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0377>

炭基辅料对羊粪好氧堆肥中氮素损失的影响

王海候, 何胥, 陶玥玥, 金梅娟, 陆长婴, 施林林, 周新伟, 沈明星

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 928–936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0664>

有机酸对As(V)在土壤中老化的影响

高雪, 曾希柏, 白玲玉, 尼玛扎西, 苏世鸣, 王亚男, 吴翠霞

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1526–1536 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0189>

堆肥中不同氮素原位固定剂的综合比较研究

江滔, 常佳丽, 马旭光, 李国学

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 369–375 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0996>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

薛文涛, 孙昊, 孙钦平, 等. 有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1086–1096.

XUE W T, SUN H, SUN Q P, et al. Effects of organic acid additives on nitrogen loss in low C/N ratio during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1086–1096.



开放科学 OSID

有机酸添加剂对低碳氮比条件堆肥氮素损失控制效果研究

薛文涛, 孙昊, 孙钦平, 张玲, 吴荣, 田野, 陈益山, 邹国元, 刘善江*

(北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097)

摘要:为减少堆肥过程中的氨气挥发和氮素损失,以鸡粪、玉米秸秆和菌渣为发酵原料,采用强制通风静态堆肥罐进行41 d的好氧堆肥试验,研究低C/N(15)条件下两种有机酸(柠檬酸、草酸)对堆肥过程中氨气减排效果和氮素形态转化的规律。结果表明:添加5%(鲜质量)的柠檬酸、草酸增加了堆肥50℃以上高温天数和连续高温天数,降低了堆肥初始物料1.70个和1.88个pH值单位。草酸对堆肥主要发酵时期氨气减排有较好的效果,柠檬酸对氨气减排的影响主要集中在堆肥前10 d,随后减排效果减弱。与CK相比,柠檬酸、草酸分别降低堆肥过程中氨气累积挥发量44.15%和69.57%,氮素损失量分别降低了25.16%和48.54%。堆肥中氮素主要以有机氮的形态存在,与CK相比,添加柠檬酸、草酸处理有机氮含量分别提高了9.44%和23.13%,氨基酸态氮含量提高了11.23%和15.53%,酰胺态氮含量提高了18.43%和39.99%。柠檬酸、草酸提高了堆肥结束时无机氮含量,与CK相比,铵态氮含量分别提高了68.13%、408.48%,硝态氮含量提高了17.94%、45.75%。堆肥结束后CK、柠檬酸、草酸处理有机碳含量分别下降了31.44%、22.16%、15.70%。各处理温度、粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率均达到《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195—2018)要求,但是草酸处理种子发芽指数未达到无毒害标准。试验结果表明,添加有机酸具有较好的氮素损失控制效果,且添加草酸效果优于柠檬酸,但是从堆肥产品无害化角度考虑,草酸添加量和添加方式还有待进一步研究。

关键词:有机酸;堆肥;低碳氮比;氨挥发;有机态氮组分

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)05-1086-11 doi:10.11654/jaes.2021-1203

Effects of organic acid additives on nitrogen loss in low C/N ratio during composting

XUE Wentao, SUN Hao, SUN Qinqing, ZHANG Ling, WU Rong, TIAN Ye, CHEN Yishan, ZOU Guoyuan, LIU Shanjiang*

(Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Ammonia volatilization as a result of composting processes has raised public concern. The study of ammonia emission control technology in composting can provide a reference for effective control of nitrogen loss. Studies on this ammonia emission and its control can provide practical technology for efficient nitrogen loss control. To reduce ammonia volatilization and nitrogen loss in the process of composting, chicken manure, corn straw, and bacterial residue were composted aerobically for 41 days in static forced-aeration composting reactors. The effects of two organic acids (citric acid and oxalic acid) on ammonia emission reduction and nitrogen transformation in

收稿日期:2021-10-20 录用日期:2021-12-29

作者简介:薛文涛(1991—),男,山西吕梁人,硕士研究生,助理研究员,从事农业废弃物处理与资源化利用研究。E-mail: xwtbj2014@163.com

*通信作者:刘善江 E-mail: liushanjiang@263.net

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801400);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20190302);北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所科技能力提升专项(YZS201908)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0801400); The Science and Technology Innovation Ability Construction Project of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (KJCX20190302); The Science and Technology Capability Improvement Project of the Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (YZS201908)

composting process under low C/N (15) conditions were investigated in this study. The results showed that 5% (fresh weight) citric acid and oxalic acid addition increased the number of days with a maximum temperature above 50 °C and the number of consecutive high temperature days as well as reduced the pH value of the initial compost by 1.70 and 1.88. Oxalic acid had a significant effect on ammonia emission reduction during the fermentation period of composting, while the reduction of ammonia volatilization by citric acid addition was primarily concentrated in the first 10 days of composting, and then the ammonia volatilization rate increased rapidly. Compared with the control treatment, citric acid and oxalic acid addition treatments reduced the cumulative ammonia volatilization by 44.15% and 69.57% and reduced total nitrogen loss by 25.16% and 48.54%, respectively. Nitrogen in compost mainly exists in the form of organic nitrogen. Compared with the control treatment, citric acid and oxalic acid addition also increased the organic nitrogen by 9.44% and 23.13% and increased the amino acid nitrogen by 11.23% and 15.53%, respectively. Furthermore, the amide nitrogen content increased by 18.43% and 39.99%, respectively. The addition of citric acid and oxalic acid increased the content of inorganic nitrogen at the end of composting, the ammonium nitrogen was raised by 68.13% and 408.48%, and nitrate nitrogen was raised by 17.94% and 45.75%, respectively. The contents of organic carbon decreased by 31.44%, 22.16%, and 15.70% in control, citric acid treatment and oxalic acid treatment, respectively. All treatments met the relevant requirements of composting maturity based on temperature, fecal coliform number, and ascaris egg mortality. However, the seed germination index of oxalic acid treatment did not meet the non-toxic standard. The results of the study indicates that adding organic acids has significant effects on nitrogen loss reduction, and oxalic acid is a better choice than citric acid. However, the addition amount and method of oxalic acid as harmless composting products needs to be further studied.

Keywords: organic acid; composting; low C/N; ammonia volatilization; organic nitrogen form

我国每年产生大量的农业废弃物,其中畜禽粪便约38亿t,秸秆约9亿t^[1-2],堆肥技术具有成熟度高、处理量大、产品经济效益较好的优点,因此已经成为目前农业废弃物的主要处理利用方式。但是堆肥过程温度较高、微生物活性较强、需要翻堆等原因导致大量含氮气体挥发损失,其中氨挥发是氮素损失的主要途径^[3-6]。大量的氮素损失不仅会导致堆肥产品肥效下降,还会造成温室效应和大气污染、危害人畜健康、腐蚀设备以及带来酸雨危害和水体富营养化。随着农业废弃物堆肥化处理进程的加快,堆肥处理过程中氮素损失及其控制措施愈发受到国内外研究者的关注。

国内外针对农业废弃物堆肥氮素损失途径、机理以及氮素保留技术已经开展了大量的研究,主要的氮素损失控制技术包括调节原料C/N、通风与控制氧气供应、接种微生物菌剂、添加物理吸附剂和化学添加剂^[4-5,7-10]。在原料及其配比确定的情况下,通过添加化学添加剂降低物料pH、增强铵态氮的化学固定,是目前固氮效果最好、适用性最强的方式^[3]。目前,常用的化学添加剂包括磷镁盐、过磷酸钙、磷石膏、磷酸、硫酸等^[6,8,10-12],但是其中过磷酸钙、氢氧化镁等物质成本较高,硫酸、磷酸等物质使用具有一定的安全风险,不易购买,后续还田利用可能造成农田土壤盐渍化风险。

有机酸具有一定的酸性,而且来源广泛,使用安全性较高,所以近些年已开展堆肥过程添加有机酸氮素保全效果研究。NIE等^[13]研究了乳酸对畜禽粪便与屠宰污泥共堆肥的影响,结果表明乳酸的加入降低

了NH₃的排放,促进了堆肥产品的腐熟,0.4%、0.7%和1%的乳酸处理中NH₃排放形式的氮损失分别较空白处理降低3.36%、8.29%和14.65%。潘君廷^[14]在堆肥中添加柠檬酸,结果可降低51%的氨挥发。

虽然目前有机酸添加对堆肥氨减排具有一定的效果,但是主要侧重与常规添加剂对比,而缺少不同有机酸氨减排效果的研究,而且大多研究通过初始物料调整使其在达到适宜C/N(20~30)条件下开展研究,但是在鸡粪等低碳氮物料发酵过程中为了减少成本、提升处理能力、提高有机肥产品氮养分含量,往往存在着相对较少秸秆等辅料添加,从而使堆体维持相对较低的C/N(15左右)的情况。大量研究表明随着堆体初始C/N降低氨挥发量将显著提高^[15-16],从而降低氨减排效果。目前低C/N条件下堆肥有机酸添加对氨减排与氮素保全效果研究缺乏,鉴于此,本研究以草酸和柠檬酸为有机酸添加剂,通过开展鸡粪、秸秆和菌渣在低C/N(15左右)条件下堆肥,对堆肥过程中氨气挥发以及堆肥物理化指标进行监测,从而为低C/N堆肥情况下氨气高效减排和氮素保留提供可选方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在北京市农林科学院温室进行。以鸡粪、秸秆、菌渣为主要发酵原料,鸡粪选择北京平谷某养殖场新鲜鸡粪,秸秆为玉米秸秆,堆肥前进行粉碎,粒径

为10~20 mm,菌渣为北京大兴区某平菇生产厂产生的菌棒废弃物,各原料初始理化指标见表1。草酸为市场购买的工业级原料,柠檬酸为市售食品级纯度。

1.2 试验方法与设计

通过原料调节,控制初始C/N在15左右,含水率60%左右(鸡粪10 kg、秸秆5 kg、菌渣1 kg),柠檬酸和草酸添加比例为堆肥物料鲜质量的5%,即0.8 kg。为了确保有机酸添加的均匀性,堆肥物料均分为4等份,每份鸡粪2.5 kg、秸秆1.25 kg、菌渣0.25 kg,在搅拌过程中均匀添加0.2 kg的有机酸,最后4份物料再进行混匀搅拌。

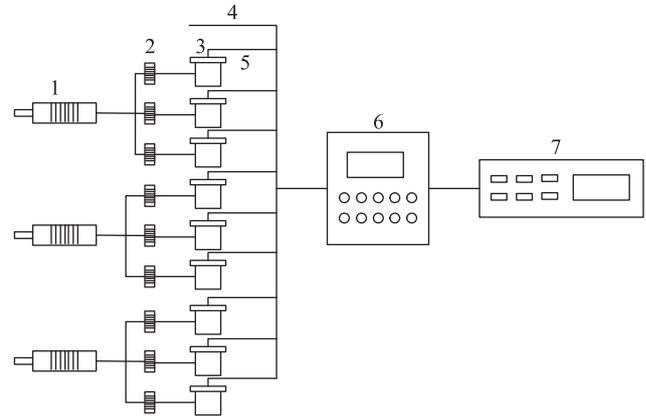
堆肥设备为密闭式反应仓,体积为60 L。试验设置CK、柠檬酸、草酸3个处理,每个处理设置3个重复,共计9组。试验采用间歇式供气,由气泵进行供气,流量计进行流量控制与监测,通气量设置为 $6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,通气频率为 $30\text{ min}\cdot\text{h}^{-1}$ 。堆肥过程采用精创RE-4型温度记录仪对堆体的温度进行连续监测,探头监测深度为堆体内30 cm,监测间隔为5 min,取24 h监测均值作为当日平均温度。试验装置示意图见图1。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

在堆肥第3、11、25、41 d翻堆,堆肥初始及每次翻堆完成后采样,共计5次。采样方式为五点采样法,即中心和四角部位采集样品共约1 kg,然后混合均匀,通过四分法取250 g左右样品带回实验室进行检测,其他样品放回堆体。采集的新鲜样品部分用于测定含水量、粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率、有机态氮组分;部分放于室内风干粉碎过1 mm筛,测定全氮、全磷、全钾、有机质、铵态氮、硝态氮、pH、电导率。

试验采用多通道气体采集器和GSM500在线气体检测器进行气体采集和在线检测,气体采集器选择10路通道,依次为空气通道(1路)、CK通道(3路)、柠檬酸通道(3路)、草酸通道(3路)。多通道气体采集器单通道采集时间设置为6 min,GSM500在线气体检测器检测频率为2 min,即每个通道检测3个数值,选



1. 气泵; 2. 流量计; 3. 发酵罐; 4. 空气采样管; 5. 堆肥气体采样管; 6. 多通道气体采集器; 7. 在线气体检测器
1. Air pump; 2. Gas flowmeter; 3. Composting reactor; 4. Air sampling tube; 5. Compost gas sampling tube; 6. Multichannel gas collector; 7. On line gas detector

图1 试验装置示意图

Figure 1 Experimental devices schematic diagram

择中间数值作为实测值。

1.3.2 分析方法

含水率:新鲜样品称质量后,在温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒质量,则含水率=(鲜质量-干质量)/鲜质量 $\times 100\%$

全氮(TN)含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-凯氏定氮法测定;全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定,全钾(TK)含量采用火焰原子吸收光度计(英国Sherwood公司生产,型号:M410)测定;有机质(OM)含量采用重铬酸钾法测定,有机碳(TOC)按照有机质/1.724计算;C/N为有机碳/全氮;pH采用pH计(上海雷磁PHS-3C,中国)测定;电导率(EC)用电导率仪(DDS-307,雷磁)测定;铵态氮、硝态氮含量用A3连续流动分析仪测定;粪大肠菌群数按照《肥料中粪大肠菌群的测定》(GB/T 19524.1—2004)的方法测定,蛔虫卵死亡率按照《肥料中蛔虫卵死亡率的测定》(GB/T 19524.2—2004)的方法测定。有机氮及其组分含量测定参照BREMNER酸解法^[17]。

种子发芽指数:称取堆肥41 d时的新鲜样品30 g

表1 堆肥原料理化指标

Table 1 Basic physical and chemical characters of raw materials

物料 Material	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%	全钾 Total potassium/%	有机碳 Total organic carbon/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比 C/N ratio	含水率 Water content/%	pH
鸡粪 Chicken manure	3.91	1.17	1.86	479.70	12.27	59.60	6.31
玉米秸秆 Maize stover	1.22	0.32	1.62	415.89	34.09	69.50	5.94
菌渣 Mushroom dreg	1.94	0.56	1.16	387.47	19.97	62.15	6.76

于250 mL三角瓶,再加90 mL去离子水,振荡2 h,单层滤纸过滤,吸取5 mL滤液至垫有双层滤纸的9 mm培养皿中,然后放入20粒小白菜籽粒,盖上培养皿上盖,放入培养箱中,25℃培养48 h。每个样品4个平行,测定小白菜种子的根长和发芽率,同时用去离子水作空白对照。

1.3.3 计算方法

(1) 氨气挥发速率

$$V_{\text{NH}_3-\text{N}} = \sum_{i=1}^n (C_i - C_{i0}) \times h \times V \times 1\,000 / (n \times 1\,000)$$

式中: $V_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为氨气挥发速率, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; C_i 为第*i*次测得的气体含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_{i0} 为第*i*次测得的空气含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; h 为每日通风时间,本研究为12 h; V 为通气流量,本研究为 $0.36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; n 为每日气体检测次数,本研究为24次。

(2) 氮素损失

$$L_N = (q_0 \times M_0 - q_1 \times M_1) \times 100 / (q_0 \times M_0)$$

$$L_{\text{NH}_3-\text{N}} = M_{\text{NH}_3-\text{N}} \times 100 / (q_0 \times M_0)$$

$$L_0 = L_{\text{NH}_3-\text{N}} \times 100 / L_N$$

式中: L_N 为氮素损失率,%; q_0 为初始TN含量,%; M_0 为初始物料干质量,kg; q_1 为结束时TN含量,%; M_1 为结束时物料干质量,kg; $L_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为氨挥发氮素损失率,%; $M_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为氨挥发累积氮素损失量,g; L_0 为氨挥发氮素损失占比,%。

(3) 种子发芽指数

种子发芽指数=(浸提液处理的种子发芽率×根长)/(对照的种子发芽率×根长)×100%

1.3.4 试验数据分析

试验数据通过Excel 2007、SPSS 19.0软件进行分析,应用Duncan方法分析各处理间数据在0.05水平的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中堆体温度变化

堆肥过程中堆体温度变化如图2所示,各处理温度变化趋势基本相同,均经历了4个阶段,即升温阶段、高温阶段、降温阶段以及腐熟阶段,符合堆肥过程温度变化规律^[6,8]。第1、2次翻堆后(3、11 d)温度出现快速上升,主要是翻堆后堆体保持较好的孔隙结构,有利于微生物繁殖和活动。CK、柠檬酸、草酸处理第1次温度峰值分别出现在堆肥第5、6、7天,第2次温度峰值分别在堆肥第13、12、12天。

柠檬酸、草酸处理初始温度上升慢于CK,CK在堆肥第3天即达到50℃以上,第4天达到60℃以上;柠檬酸处理在第4天达到50℃以上,第5天达到60℃以上;草酸处理在第4天达到50℃以上,第7天达到60℃以上。有机酸添加可降低堆肥物料pH,抑制初始堆体微生物活性^[18]。CK在堆肥8 d后温度开始下降,而柠檬酸、草酸处理仍维持较高的温度。整个堆肥周期,CK、柠檬酸、草酸处理50℃以上维持天数分别为7、12、9 d,60℃以上维持天数分别为4、3、2 d。添加有机酸能够增加堆肥高温时间,特别是能提高连续高温时间,这与潘君廷^[14]通过添加柠檬酸延长高温时间的结论一致。虽然加入有机酸抑制了堆肥初期微生物活性,但是随着有机酸消耗和pH上升(图3),微生物的抑制作用降低,此外,相对充足的有机原料延长了微生物分解时间,分解产生的热量使得堆体温度相对稳定。从高温时间看,各处理均达到《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195—2018)中好氧堆肥技术50℃以上7 d的规定。

2.2 堆肥过程中堆体的pH变化

堆肥物料的pH是堆体中微生物活性和氨气排放

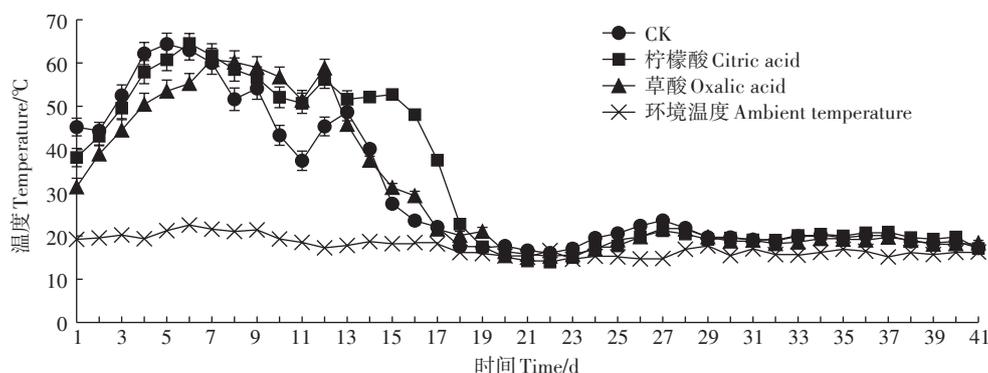


图2 堆肥过程中温度变化

Figure 2 Changes of the temperature during composting

量的重要影响因素^[10]。堆肥过程中堆体pH变化如图3所示,CK、柠檬酸、草酸处理初始pH分别为6.23、4.53、4.35。与CK相比,柠檬酸、草酸处理显著降低了物料初始pH($P<0.05$),草酸对pH的降低效果优于柠檬酸,主要是因为草酸酸性强于柠檬酸,且其具有较小的分子量。堆肥前11 d,堆体物料中的有机质在高温环境下被微生物快速分解,产生了大量的铵态氮,导致pH上升^[6],随着氨气的挥发以及有机酸的产生^[8],CK的pH在第11天开始逐渐下降,堆肥后期在有机物降解形成的碳酸盐缓冲液作用下pH最后趋于稳定,结束时为7.39;柠檬酸、草酸处理初始较低的pH抑制了微生物活性,初期pH上升较慢,随着pH逐渐上升,微生物抑制效果减弱,微生物逐渐开始分解利用有机酸并产生大量的铵态氮,酸抑制效果减弱。3~28 d柠檬酸、草酸处理pH分别上升了2.04、1.47个单位。总体看,CK、柠檬酸、草酸处理堆肥结束后pH均高于初始值。

2.3 堆肥过程中堆体的EC变化

堆肥过程中堆体的EC变化如图4所示。由图4可以看出CK和柠檬酸处理EC全程变幅相对较小,在600~1 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,草酸处理EC变幅较大且明显高于其他两组处理。堆肥初期在微生物作用下堆体有机物质被分解成简单化合物以及水溶性矿物离子而被释放,从而可提高堆肥EC^[19]。随着堆体氨挥发造成的铵态氮损失及各种矿物盐离子沉淀,EC开始下降^[20]。草酸由于堆肥前期和中期氨挥发较低,铵态氮等离子损失少及高温造成水分的持续减少,导致EC持续升高,随后由于氨挥发提高造成的铵态氮减少、浓缩效应减弱及反硝化作用^[21-22]等,导致了EC下降。CK、柠檬酸、草酸处理初始EC分别为824、804、1 002 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,结束时分别为862、855、

1 930 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,分别提高了4.61%、1.79%、92.60%,添加草酸显著提升了堆体EC。EC反映堆体离子总含量的大小,是判断堆肥是否腐熟的必要条件^[23],一般认为腐熟堆肥EC小于4.00 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时可以安全施用^[24],本试验3组处理均可达到施用标准。

2.4 堆肥过程中堆体铵态氮、硝态氮含量变化

堆肥过程中堆体铵态氮含量变化如图5a所示,堆肥初始微生物利用有机氮并矿化生成铵态氮,提高了堆体铵态氮含量,CK在第3天达到最高值5 040 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,柠檬酸、草酸处理在第11天达到最高值,分别为6 020 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和7 585 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。柠檬酸和草酸虽然由于较低的pH抑制了微生物活性,但是其氨挥发较少,而CK初期温度较高及氨化细菌的活性增强,大量氨挥发造成的铵态氮损失,使其堆体铵态氮含量低于柠檬酸和草酸处理^[25]。从第11天开始柠檬酸处理铵态氮含量迅速下降,这是由pH迅速上升导致氨挥发损失,以及温度下降导致微生物硝化作用加强和生物固定化作用^[26]等多方面综合作用引起。草酸同样呈现出铵态氮含量迅速下降的趋势,但是氨挥发速率并未出现明显的升高,主要是由于温度下降较快引起更强的微生物硝化作用和生物固定化作用,以及较低的pH导致部分铵态氮以氧化亚氮的形态损失^[21-22]。试验结束时CK、柠檬酸、草酸处理铵态氮含量分别为466、783.5、2 369.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草酸处理铵态氮含量显著高于CK、柠檬酸处理($P<0.001$)。与初始值相比,3组处理降幅分别达到88.60%、83.33%和44.57%。本试验得出的添加有机酸提高堆肥铵态氮含量的结论与MCRORY等^[27]通过研究证实酸或酸性盐等化学添加剂通过化学固定作用,促进氮素更多地以铵态氮(氨或铵)形式贮存在物料中的结论一致。

好氧堆肥中的硝化作用与氮元素从还原态转化

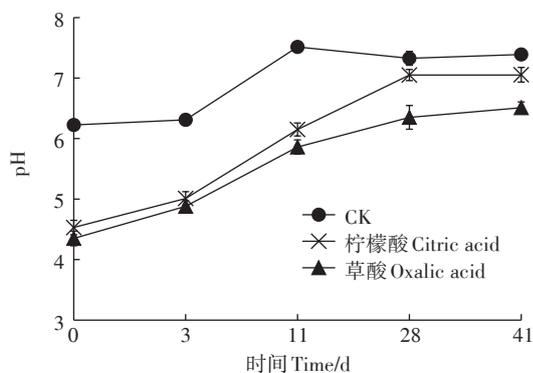


图3 堆肥过程中堆体pH的变化

Figure 3 Changes of the pH value during composting

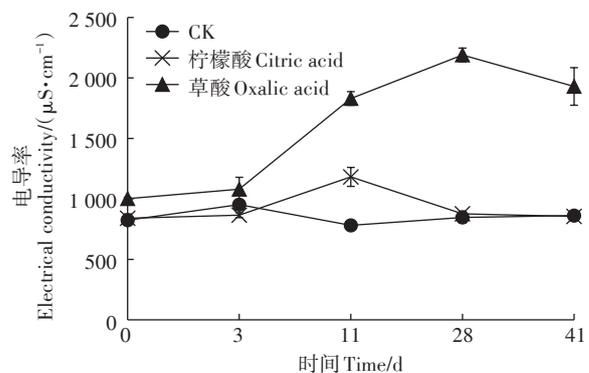


图4 堆肥过程中堆体EC的变化

Figure 4 Changes of the EC during composting

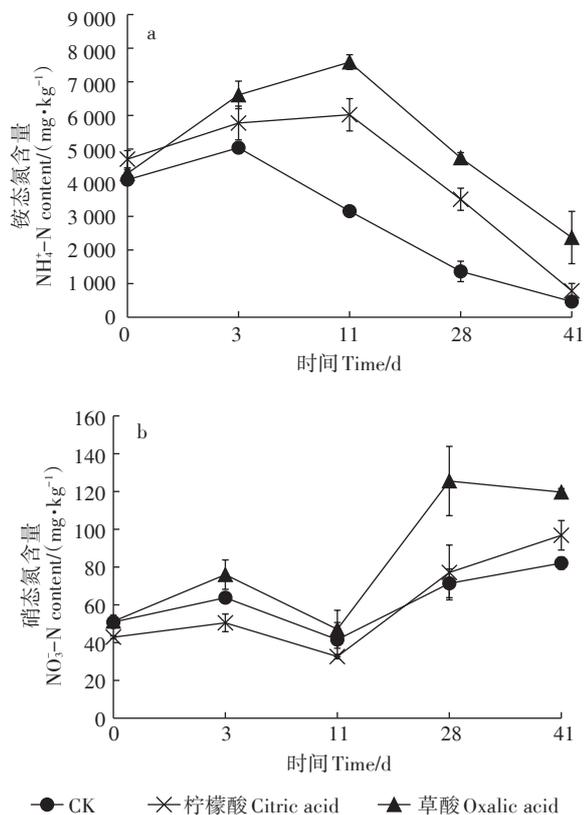


图5 堆肥过程中堆体铵态氮和硝态氮含量的变化

Figure 5 Changes of the NH₄⁺-N and NO₃⁻-N during composting

为氧化态的转化过程密切相关^[14]。堆肥过程中堆体硝态氮含量变化如图5b所示,堆肥初期温度较低,对硝化细菌的活性抑制有限,前3 d各处理硝态氮均呈现上升趋势,CK、柠檬酸、草酸处理分别达到了63.8、50.5、76.0 mg·kg⁻¹,随后各处理温度快速上升,抑制了硝化细菌的活性^[8]。随着堆肥温度降低,硝化细菌活性增强,各处理硝态氮含量快速上升,CK、柠檬酸处理在第41天达到最高值,分别为82.1、96.83 mg·kg⁻¹,草酸处理在第28天达到最高值125.55 mg·L⁻¹,随后下降到119.66 mg·kg⁻¹,试验结束时3组处理间均达到显著差异($P<0.05$)。本试验中硝化作用主要发生在堆肥腐熟期,与其他研究结论一致^[28]。与初始相比,各处理硝态氮含量分别增加了61.30%、125.70%、133.26%。本试验有机酸添加增加了堆肥硝态氮含量,这与吴梦婷等^[10]通过堆肥添加硫酸亚铁显著提高了有机肥中硝态氮含量的结论一致。但从整体看,所有处理硝态氮含量都低于0.15 g·kg⁻¹,说明堆肥过程中各处理的硝化作用都比较弱。

堆肥中的无机氮以铵态氮为主^[5,8],堆肥结束后CK、柠檬酸、草酸处理铵态氮/硝态氮比值分别为

5.68、8.09、19.80,添加有机酸显著提高了堆肥铵态氮/硝态氮比值($P<0.05$)。

2.5 堆肥过程中堆体全氮含量变化

堆肥过程中堆体全氮含量变化如图6所示,3组处理全氮变化趋势差异较大,CK、柠檬酸、草酸处理初始全氮含量分别为32.87、32.53、32.17 g·kg⁻¹。前3 d 3组处理全氮含量均上升,随后CK全氮开始下降,到第11 d达到最低点30.95 g·kg⁻¹,而后开始上升并趋于稳定。柠檬酸处理全氮在堆肥开始的11 d内持续上升,最高达到39.50 g·kg⁻¹,随后开始下降,后期出现小幅上升。草酸处理在堆肥前28 d全氮持续上升,最高达到42.55 g·kg⁻¹,随后小幅下降。CK、柠檬酸、草酸处理堆肥结束后全氮含量分别为33.90、37.83、41.67 g·kg⁻¹,柠檬酸、草酸处理分别比CK全氮含量提高了11.59%、22.92%。

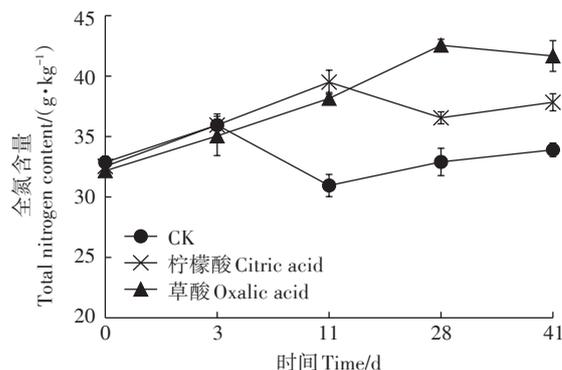


图6 堆肥过程中堆体全氮含量变化

Figure 6 Changes of the total nitrogen during composting

已有研究^[29-31]表明,堆肥过程中全氮含量增加的主要原因是浓缩效应,即堆肥质量减少的速度比氮素减少的速度更快,导致堆肥过程中氮相对富集。3组处理全氮初始均上升主要是初始氨挥发损失相对较低,CK全氮出现下降的主要原因是堆肥高温期氨挥发造成的氮素损失高于干物质质量损失。11~28 d pH快速上升导致的氨挥发量增加,使柠檬酸处理全氮含量快速下降,而草酸前期氨挥发始终稳定在较低的水平,其全氮含量在堆肥前28 d始终维持上升趋势,随后由于硝化反硝化作用,其氮素损失增加,导致后期出现小幅下降。堆肥结束后3组处理间全氮含量达到显著差异($P<0.05$),说明有机酸添加对堆肥氮素保留有明显效果,且草酸效果优于柠檬酸。

2.6 堆肥氨气挥发速率及累积排放量变化

堆肥过程中氨气挥发速率变化如图7a所示,3组试验氨气挥发均呈现先升后降的变化趋势,堆肥初期

微生物将含氮有机物质分解为铵态氮等无机氮,在高温条件下氨气挥发速率逐渐升高^[32]。CK在第7天达到第一个挥发峰值 $3.45 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,此后由于堆体温度的下降,氨气挥发速率逐渐下降。第二次翻堆后随着堆体温度的升高,氨气挥发速率快速上升,于第13天达到第二个挥发峰值 $3.06 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,此后随着温度的下降及铵态氮含量的降低,氨气挥发速率逐渐减小,21 d后降到 $1.0 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下。

在初始的10 d内,柠檬酸、草酸处理均表现出较好的氨气减排效果,减排率在70%以上,最高达到了93.39%和94.59%。第11天开始柠檬酸处理由于pH的升高及持续堆体高温,引发堆体大量的铵态氮以氨气的形态挥发,在第16天达到峰值 $2.49 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,随后开始波动下降。草酸在整个堆肥过程中均维持较低的挥发速率,均未超过 $1.0 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。堆肥结束时3组处理氨气挥发速率均降到 $0.05 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下。

第1、2次翻堆后3组处理氨气挥发速率均有明显上升,这主要是由于翻堆增加了物料与空气的接触,提高了堆体含氧量和孔隙度,增强了微生物活性,从而提高堆体温度、降低含水率^[26]。CK氨气挥发主要出现在堆肥前3周,高温期是其重要的挥发时期,这

与吴娟等^[15]得出堆肥氨挥发主要集中在前3周的结果一致,而部分学者^[33-35]研究认为氨气挥发主要出现在堆肥前2周,随后快速下降到较低的水平。主要原因是本试验堆肥物料初始C/N相对较低(15),堆体含氮量较高,导致了氨气挥发时间的延长。

3组处理氨气累积挥发量如图7b所示,均表现为初始缓慢增加,随后开始快速上升,最后缓慢增加到稳定的过程。CK、柠檬酸、草酸处理整个堆肥周期累积挥发量分别为41.38、23.11、12.59 g,3组处理间达到显著差异($P < 0.05$),与CK相比,柠檬酸、草酸处理氨气累积挥发量减少了44.15%和69.57%。

2.7 堆肥过程中氮素损失

堆肥过程中氮素损失如表2所示,各处理氮素损失分别占初始全氮的24.64%、18.44%、12.68%,添加有机酸有效降低了堆肥氮素损失,柠檬酸和草酸处理氮素损失分别降低了25.16%和48.54%。CK氨挥发损失占全氮损失的68.85%,是最主要的氮素损失途径,这与王友玲等^[5]、郜斌斌等^[6]的研究结论一致。添加有机酸后,氨挥发氮素占比下降,可能是因为提高了堆体氧化亚氮的挥发量,许多研究表明,堆肥过程中pH与氧化亚氮排放之间存在显著

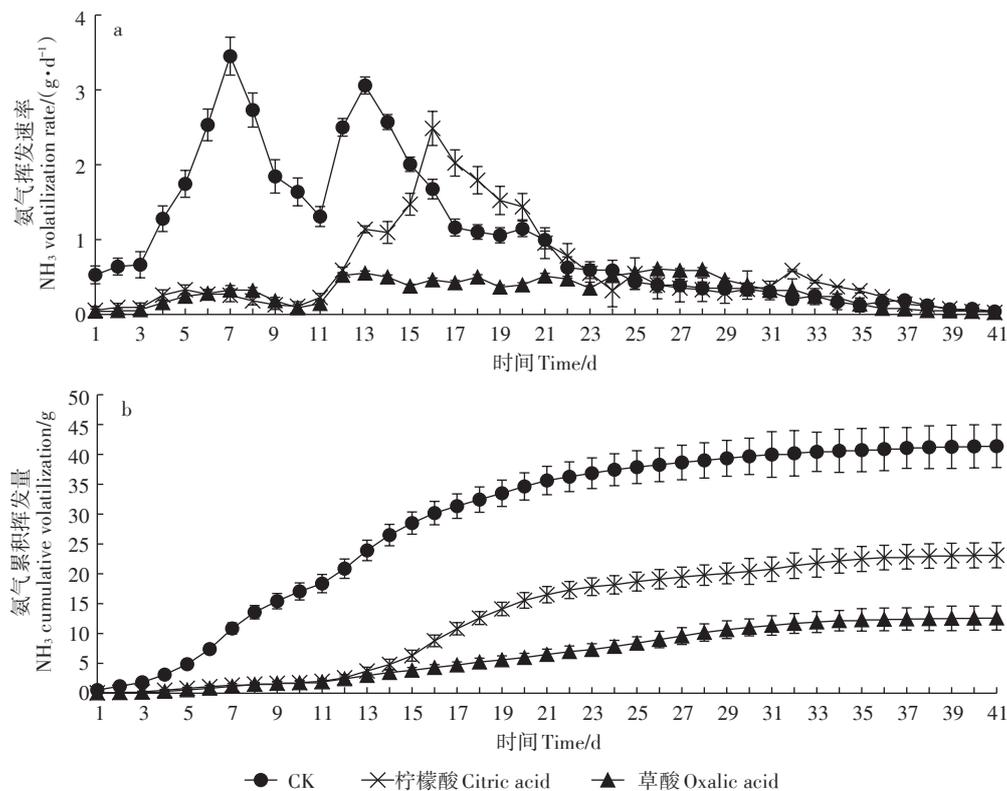


图7 堆肥过程中氨气挥发速率和累积挥发量的变化

Figure 7 Changes of the NH_3 volatilization rate and cumulative volatilization during composting

的负相关关系^[8, 21-22]。

2.8 不同处理堆肥结束后有机氮及其组分含量

堆肥过程中氮素损失如表3所示,有机氮是堆肥原料中氮的主要形式,可以在蛋白质、多肽、氨基酸、核酸、氨基糖等多种分子形式中存在^[9]。本研究表明堆肥结束后氮大部分是以有机氮形态存在,这与前人的研究结论一致^[5, 36]。柠檬酸和草酸处理有机氮含量分别比CK提高了9.44%和23.13%,草酸处理显著高于CK和柠檬酸处理($P<0.05$)。柠檬酸、草酸处理氨基酸态氮和酰胺态氮含量显著高于CK($P<0.05$),分别提高了11.23%、15.53%和18.43%、39.99%。酰胺态氮是有机氮的主要组成,CK、柠檬酸、草酸处理的酰胺态氮占比分别为51.40%、55.62%、58.44%。

在堆肥过程中较低pH抑制微生物对有机氮的分

解是柠檬酸处理有机氮含量显著高于其他处理的主要原因。本研究得出的酰胺态氮占比高于以往研究^[37],主要是因为本试验发酵原料为鸡粪,其蛋白质和氨基酸含量较高,堆肥期间物料中由脱氨基或水解产生的氨基糖和氨基酸合成了大量酰胺态氮。氨基酸态氮、氨基糖态氮及酰胺态氮在土壤中通过矿化形成的无机态氮,在植物营养上具有相当高的有效性^[36],添加草酸和柠檬酸显著提高了堆肥产品的氮素有效性,且草酸的效果优于柠檬酸。

2.9 堆肥过程中堆体有机碳和C/N变化

堆肥过程中堆体有机碳变化趋势如图8a所示,在堆肥过程中有机碳被微生物分解利用后转化为CO₂和腐殖质物质,因此整个堆肥周期内有机碳呈现下降趋势,这与前人的研究结论一致^[12, 19],高温阶段

表2 堆肥过程中氮素损失(%)

Table 2 The total nitrogen loss during composting(%)

处理 Treatment	氮素损失 Total nitrogen loss	氨挥发氮素损失 NH ₃ volatile nitrogen loss	氨挥发氮素损失占比 NH ₃ volatile nitrogen loss as a percentage of total nitrogen loss
CK	24.64±1.07a	16.95±1.05a	68.85±4.63a
柠檬酸	18.44±2.14b	8.70±0.91b	47.90±9.74b
草酸	12.68±1.34c	4.86±0.72c	38.84±8.64b

注:同一列不同小写字母代表同一指标在 $P<0.05$ 水平上具有显著差异。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in same index at $P<0.05$. The same below.

表3 堆肥结束后有机氮及其组分含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 The content of organic nitrogen components after composting(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	有机氮 TON	氨基酸态氮 AAN	氨基糖态氮 ASN	酰胺态氮 AN
CK	23 843.61±1 583.69b	573.00±14.18b	72.89±4.79a	12 256.13±1 078.55c
柠檬酸	26 094.06±1 523.52b	637.33±13.43a	52.43±10.70b	14 514.63±899.57b
草酸	29 359.38±1 000.09a	662.00±28.05a	90.56±11.25a	17 156.79±1 005.88a

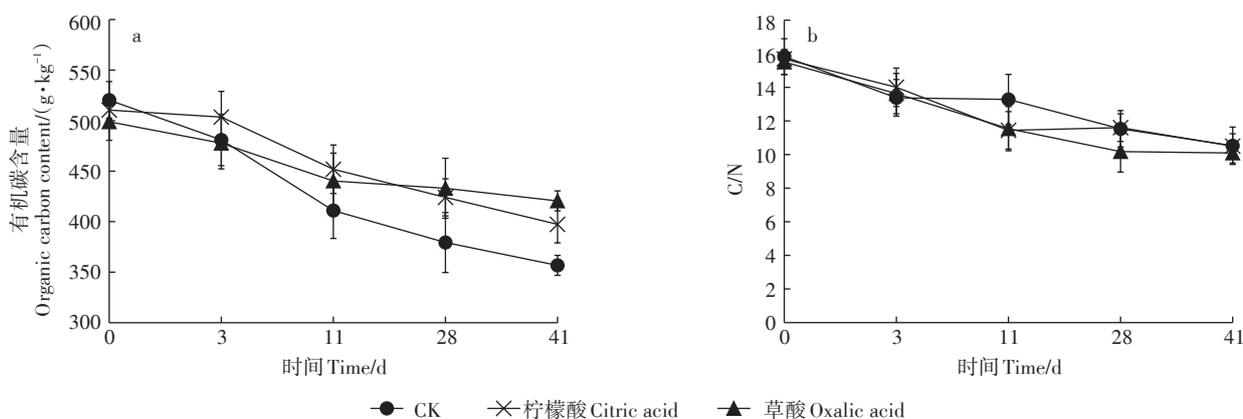


图8 堆肥过程中堆体的有机碳和C/N的变化

Figure 8 Changes of organic carbon and C/N ratio during composting

(3~11 d)是有机质重要的分解时期。柠檬酸处理由于11 d后pH快速上升,减少了对微生物的抑制作用,同时较高的温度加速了有机质的分解,所以后期相比CK和草酸处理仍呈现较快的下降趋势。结束时CK、柠檬酸、草酸处理有机碳含量达到了356.73、397.33、420.53 g·kg⁻¹,较初始值分别下降了31.44%、22.16%、15.70%。柠檬酸、草酸处理降幅显著低于CK^[10,15],主要是由于微生物首先分解更容易利用的小分子有机酸,从而减少了对物料有机碳的分解,而且整个过程柠檬酸、草酸处理较低的pH限制了微生物对有机碳的分解,这与潘君廷^[14]通过添加元素硫降低初始pH抑制了有机质下降的结果一致。程丰^[38]的研究结果也表明,添加5%氨三乙酸降低堆体pH后,堆肥有机碳降幅低于CK。但胡雨彤等^[12]的研究表明添加硫酸加快了有机物的降解,主要是由于硫酸的强氧化性对有机碳的矿化有促进作用,而本试验采用的有机酸未有此特性。

堆肥过程中堆体C/N变化趋势如图8b所示,堆肥过程中由于有机碳的消耗高于氮素,所以堆肥过程中C/N一般为下降趋势^[39],这与本试验得出的3组处理在整个堆肥周期内C/N呈现逐渐下降趋势一致。CK、柠檬酸、草酸处理初始C/N分别为15.83、15.69、15.51,结束时分别为10.52、10.50、10.09,降幅分别为33.53%、33.06%、34.92%,3组处理间无显著差异。

2.10 堆肥结束后物理化性质

堆肥结束后物理化性质如表4所示,3组处理粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率等均达到了《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195—2018)的要求。通常种子发芽指数大于50%的堆肥产品被认为已基本已无毒害,种子发芽指数大于80%的堆肥产品达到完全腐熟,由此可以看出只有CK达到完全腐熟标准,草酸处理种子发芽指数未达到无毒害标准。研究表明铵态氮含量过高会抑制植物生长^[38,40],本试验中柠檬酸和草酸处理堆肥结束后铵态氮浓度显著高于CK,且草酸和柠檬酸处理间差异显著。与CK相比,柠檬酸、草酸处理总养分达到了显著差异($P<0.05$),说明添

加有机酸能够提高有机肥总养分。

3 结论

(1)添加柠檬酸和草酸在堆肥初期会抑制温度上升,但是全过程增加了50℃以上高温天数和连续高温天数。各处理温度、粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率均达到《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195—2018)要求,草酸处理种子发芽指数未达到无毒害标准。

(2)与CK相比,柠檬酸、草酸提高了堆肥全氮含量,3组处理堆肥结束后铵态氮含量均出现了下降,硝态氮含量均上升。有机酸处理后,较高的无机氮含量有利于后续堆肥还田对作物速效氮素的快速供应。

(3)草酸对堆肥全过程均有较好的减排效果,柠檬酸处理在初始10 d内氨气减排率维持在70%以上,随后由于pH快速升高氨气挥发速率开始快速上升。CK、柠檬酸、草酸处理整个堆肥周期氨气累积挥发量分别为41.38、23.11、12.59 g,与CK相比,柠檬酸、草酸处理氮素损失量分别降低了25.16%和48.54%。

(4)有机氮是堆肥原料中氮的主要形式,堆肥结束后CK、柠檬酸、草酸处理有机氮占全氮含量分别为70.34%、68.98%、70.46%,酰胺态氮是有机氮的主要组成,CK、柠檬酸、草酸处理占比分别为51.40%、55.62%、58.44%。与CK相比,添加草酸显著提高了堆肥有机氮、氨基酸态氮和酰胺态氮含量;添加柠檬酸显著提高了堆肥氨基酸态氮和酰胺态氮含量。

(5)添加柠檬酸、草酸提高了堆肥产品有机碳含量,但是对C/N影响较小。

(6)对于堆肥氮素保留效果和氨减排效果,添加草酸优于柠檬酸,但是从堆肥产品无害化角度考虑,草酸添加量和添加方式还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[R]. 北京: 环境保护部,国家统计局,2010:6-8. Ministry of Environmental Pro-

表4 堆肥结束后物理化指标

Table 4 Basic physical and chemical characters of raw materials after composting

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%	全钾 Total potassium/%	总养分 Total nutrients/%	水分 Water content/%	粪大肠菌群数 Fecal coliform count/(个·g ⁻¹)	蛔虫卵死亡率 Determination of mortality of ascarid egg/%	种子发芽指数 Seed germination index/%
CK	3.39±0.06c	2.14±0.07a	3.23±0.13a	8.76±0.18b	50.70±1.05a	<3	未检出	80.21±7.39a
柠檬酸	3.78±0.13b	2.17±0.11a	3.30±0.10a	9.25±0.08a	51.60±1.76a	<3	未检出	64.46±5.56b
草酸	4.17±0.07a	1.98±0.07a	3.19±0.06a	9.30±0.11a	51.37±1.27a	<3	未检出	40.45±6.21c

- tection, National Bureau of Statistics. Bulletin of the first national pollution survey[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, National Bureau of Statistics, 2010:6-8.
- [2] 农业部新闻办公室. 我国主要农作物秸秆综合利用率超过80%[J]. 农业机械, 2016(6):31. Ministry of Agriculture Information Office. The main crops straw stalk comprehensive utilization rate of more than 80%[J]. *Farm Machinery*, 2016(6):31.
- [3] 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.
- [4] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):247-254. HUANG X D, HAN Z Y, SHI D Z, et al. Nitrogen loss and its control during livestock manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):247-254.
- [5] 王友玲, 邱慧珍, PHILIP G, 等. 通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):313-320. WANG Y L, QIU H Z, PHILIP G, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11):313-320.
- [6] 郜斌斌, 王选, 常瑞雪, 等. 黏土矿物和化学添加剂对牛粪堆肥过程氮素固持的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20):250-257. GAO B B, WANG X, CHANG R X, et al. Effects of clay and chemical additives on nitrogen retention during cow manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20):250-257.
- [7] 宋修超, 郭德杰, 成卫民, 等. 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中NH₃和H₂S的减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9):2014-2020. SONG X C, GUO D J, CHENG W M, et al. Pilot-scale study on effects of exogenous additives on reducing NH₃ and H₂S emissions from pig manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9):2014-2020.
- [8] 李丹阳, 李恕艳, 李国学, 等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):260-267. LI D Y, LI S Y, LI G X, et al. Effects of additive on nitrogen loss during composting of pig manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):260-267.
- [9] 马双双, 孙晓曦, 韩鲁佳, 等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11):349-354. MA S S, SUN X X, HAN L J, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11):349-354.
- [10] 吴梦婷, 梅娟, 苏良湖, 等. 硫酸亚铁和过磷酸钙对牛粪秸秆混合堆肥氮损失和腐殖化的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(10):1353-1361. WU M T, MEI J, SU L H, et al. Effects of ferrous sulfate and calcium superphosphate on nitrogen loss and humification during co-composting of cattle manure with straw[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(10):1353-1361.
- [11] 唐尚柱, 赵晓海, 斯鑫鑫, 等. 不同镁/磷盐添加剂对蓝藻堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):428-435. TANG S Z, ZHAO X H, SI X X, et al. Effects of different combinations of magnesium (Mg) and phosphorus (P) salts on nitrogen loss during cyanobacteria composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):428-435.
- [12] 胡雨彤, 时连辉, 刘登明, 等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3):718-725. HU Y T, SHI L H, LIU D M, et al. Effects of adding sulphuric acid on composting process of cattle manure and changes of main nutrients[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3):718-725.
- [13] NIE E, GAO D, ZHENG G. Effects of lactic acid on modulating the ammonia emissions in co-composts of poultry litter with slaughter sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315:123812.
- [14] 潘君廷. 不同添加剂对可生物降解固体废弃物厌氧好氧过程影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. PAN J T. Effects of different additives on anaerobic and aerobic processing during biodegradable organic waste treatment[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [15] 吴娟, 何胜洲, 李国学, 等. 添加过磷酸钙的猪粪堆肥污染气体减排工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):304-312. WU J, HE S Z, LI G X, et al. Technology mechanism of organic matter degradation mitigation and carbon, nitrogen transformation with superphosphate addition during pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):304-312.
- [16] 李艳春, 黄毅斌, 王成己, 等. 不同C/N比对双孢蘑菇培养料发酵过程温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):279-284. LI Y C, HUANG Y B, WANG C J, et al. Effects of different C/N ratios on greenhouse gases emissions and carbon and nitrogen conversion during composting of cultural materials of *A. bisporus*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):279-284.
- [17] BREMNER J M. Organic forms of nitrogen[M]//Methods of soil analysis, Wisconsin: America Society of Agronomy, 1965:1238-1255.
- [18] NAKASAKI K, YAGUCHI H, SASAKI Y, et al. Effects of pH control on composting of garbage[J]. *Waste Management & Research*, 1993, 11(2):117-125.
- [19] 谢胜禹, 余广炜, 潘兰佳, 等. 添加生物炭对猪粪好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1365-1372. XIE S Y, YU G W, PAN L J, et al. Influence of biochar on the aerobic compost of pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1365-1372.
- [20] 蔡海森. 鸡粪与稻壳堆肥影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. CAI H S. Research on composting of chicken manure and rice husk[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [21] YANG F, LI G, SHI H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36(2):70-76.
- [22] QUAN W, MUKESH K A, XIU N R, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: The effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation[J]. *Waste Management*, 2018, 74:221-230.

- [23] 常瑞雪, 甘晶晶, 陈清, 等. 碳源调理剂对黄瓜秧堆肥进程和碳氮养分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 254-259. CHANG R X, GAN J J, CHEN Q, et al. Effect of carbon resources conditioner on composting process and carbon and nitrogen loss during composting of cucumber stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2): 254-259.
- [24] LI R H, WANG J J, ZHANG Z Q, et al. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 362-368.
- [25] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 鸡粪沼渣联合好氧堆肥基质降解与气体排放研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 220-226. HUANG G Q, HUANG J, ZHANG Y, et al. Substrate degradation and gases emission during co-composting of chicken manure digestion[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 220-226.
- [26] REN X, WANG Q, ZHANG Y, et al. Improvement of humification and mechanism of nitrogen transformation during pig manure composting with black tourmaline[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307: 123236.
- [27] MCRORY D F, HOBBS P J. Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 345-355.
- [28] SONIA M T, NORA F Y T. Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37: 869-880.
- [29] 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.
- [30] YANG Y, AWASTHI M K, DU W, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 297: 122435.
- [31] GARCIA C, HERNANDEZ T, COSTA F, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1992, 23(13/14): 1501-1512.
- [32] EILAND F, LETH M, KLAMER M, et al. C and N turnover and lignocellulose degradation during composting of miscanthus straw and liquid pig manure[J]. *Compost Science & Utilization*, 2001, 9(3): 186-196.
- [33] 吴飞龙, 叶美锋, 吴晓梅, 等. 添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 598-604. WU F L, YE M F, WU X M, et al. Effects of mushroom bran addition on the process and NH_3 emissions of swine feces residue composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 598-604.
- [34] 王海候, 何霄, 陶玥玥, 等. 炭基辅料对羊粪好氧堆肥中氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 928-936. WANG H H, HE X, TAO Y Y, et al. Effect of carbonaceous amendment on nitrogen loss during the aerobic composting of sheep manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 928-936.
- [35] WANG X, SELVAM A, CHEN M T, et al. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 147(8): 17-22.
- [36] 席北斗, 赵越, 魏自民, 等. 三阶段温度控制堆肥接种法对有机氮变化规律的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 220-224. XI B D, ZHAO Y, WEI Z M, et al. Variations of organic nitrogen forms during composting process using three stages controlled by temperature[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 220-224.
- [37] 周海瑛, 邱慧珍, 杨慧珍, 等. C/N 比对好氧堆肥中 NH_3 挥发损失和含氮有机物转化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 69-77. ZHOU H Y, QIU H Z, YANG H Z, et al. Effects of C/N ratio on NH_3 volatilization loss and nitrogen-containing organic compounds conversion in aerobic composting[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(2): 69-77.
- [38] 程丰. 外源添加剂减少好氧堆肥过程氮素损失的效果研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. CHENG F. Study on the effect of exogenous additives on reducing nitrogen loss during aerobic composting[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [39] 马迪, 赵兰坡. 禽畜粪便堆肥过程中碳氮比的变化研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 193-197. MA D, ZHAO L P. A research of carbon-nitrogen ratio variation during animal manure composting [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 193-197.
- [40] 尚双华. 设施土壤氮素积累条件下番茄枯萎病发生的微生态机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016. SHANG S H. Study on micro ecological mechanism of tomato fusarium wilt under nitrogen accumulation in protected soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.

(责任编辑:叶飞)