DOI:10.13300/j.cnki.cn42-1648/s.2026.10.011

糠醛渣替代玉米秸秆对鸡粪好氧堆肥中气体排放的影响

李成贤[1],曹洪志[1],孙佳静[1],黄荣焱[1],李帅东[1],刘金艳[2],李貌[1,3*]
1.宜宾职业技术学院,四川宜宾 644100;2.重庆市潼南区小渡镇产业发展服务中心,重庆 402681;
3.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083

摘要 [目的]明确糠醛渣替代玉米秸秆对鸡粪堆肥过程中NH_3及温室气体排放的影响,并筛选兼顾保氮与碳减排的最优替代比例。[方法]2025年1月3日—2月2日,选取新鲜鸡粪、风干玉米秸秆和新鲜糠醛渣作为发酵原料,设置5个处理组:S22(C/N=22,不添加糠醛渣)、F22(C/N=22,添加6.5%糠醛渣)、F26(C/N=26,添加11.5%糠醛渣)、F30(C/N=30,添加22.3%糠醛渣)和S30(C/N=30,添加16.5%糠醛渣),进行为期30 d的好氧堆肥发酵。堆肥期间,定期监测堆体温度和pH,采用酸吸收法测定NH_3排放量,采用气相色谱法测定CO_2、CH_4和N_2O排放量,并计算各处理组温室气体的CO_2当量。[结果]添加糠醛渣可提高鸡粪好氧堆肥嗜热期温度,并通过降低初始pH值使NH_3累积排放量减少33.41%~73.98%,且pH值随糠醛渣添加量增加而逐渐降低。在相同C/N条件下,糠醛渣的添加会促进CO_2、CH_4和N_2O的排放;添加糠醛渣后,较低的C/N更有利于促进N_2O的排放。全球增温潜势(GWP)分析结果表明,F26(613 g/kg)和F30(587 g/kg)的CO_2当量远低于F22(811 g/kg)。[结论]综合考虑气体减排与温室效应控制,建议在初始C/N≥26的条件下,可以使用糠醛渣替代部分玉米秸秆进行鸡粪好氧堆肥。

关键词 玉米秸秆;鸡粪;碳氮比;糠醛渣;温室气体;好氧堆肥

Effects of replacing maize straw with furfural residue on the gas emission in aerobic composting of chicken manure

Li Chengxian[1], Cao Hongzhi[1], Sun Jiajing[1], Huang Rongyan[1], Li Shuaidong[1], Liu Jinyan[2], Li Mao[1,3*]
1.Yibin Vocational and Technical College, Sichuan Province, Yibin 644100, China; 2.Xiaodu Town Industrial Development Service Center, Chongqing, 402681, China; 3.College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract [Objectives]The effects of replacing maize straw with furfural residue on the emissions of NH_3 and greenhouse gas (GHG) in aerobic composting of chicken manure were studied and the optimal substitution ratio that balances the conservation of nitrogen and the reduction of carbon emission was determined.[Methods]

收稿日期:2026-06-09
基金项目:宜宾职业技术学院动物营养与资源开发科技创新团队(ybzy21cxtd-08);宜宾职业技术学院动物营养与资源开发研究中心平台(ybzy21kypt-07);宜宾职业技术学院院级科研项目(ZRYB24-06);竹类病虫防控与资源开发四川省重点实验室项目(ZLKF202304);宜宾职业技术学院创新创业孵化工作室(FH2020-08)
作者简介:李成贤,女,1979年生,硕士,副教授。*通信作者:李貌,男,1991年生,博士,讲师。

Fresh chicken manure, air-dried maize straw, and fresh furfural residue were used as composting materials to conduct an experiment from January 3 to February 2, 2025. 5 treatments including S22 with a carbon-nitrogen ratio (C/N) of 22 and 0% furfural residue, F22 with a C/N of 22 and 6.5% furfural residue, F26 with a C/N of 26 and 11.5% furfural residue, F30 with a C/N of 30 and 22.3% furfural residue, and S30 with a C/N of 30 and 16.5% furfural residue were set up. Aerobic composting was conducted for 30 d. The temperature and pH of pile were regularly monitored during the period of composting. The acid absorption method was used to determine the emissions of NH_3. Gas chromatography was used to determine the emissions of CO_2, CH_4, and N_2O. The CO_2 equivalent of GHG emission in each treatment was calculated. [Results]Adding furfural residue increased the temperature at the thermophilic phase in aerobic composting of chicken manure and decreased the cumulative emissions of NH_3 by 33.41%-73.98% by reducing the initial pH, with a gradual decrease in pH with the increase of furfural residue added. The addition of furfural residue promoted the emission of CO_2, CH_4, and N_2O at the same C/N. A lower C/N was more conducive to the emission of N_2O after adding furfural residue. The results of analyzing the global warming potential (GWP) showed that the CO_2 equivalent of F26 (613 g/kg) and F30 (587 g/kg) was substantially lower than that of F22 (811 g/kg).[Conclusions]Taking into account both the reduction of gas emission and the control of greenhouse effect, it is recommended to use furfural residue instead of maize straw for aerobic composting of chicken manure when the initial C/N is more than 26.

Keywords　maize straw; chicken manure; carbon-nitrogen ratio (C/N); furfural residue; greenhouse gas (GHG); aerobic composting

堆肥已被认为是一种可持续、生态友好的畜禽粪污及其他农业废弃物处理方法[1]。然而，在堆肥过程中，微生物在分解有机物时会产生一定量的气体，如氨气（NH_3）以及温室气体二氧化碳（CO_2）、甲烷（CH_4）和氧化亚氮（N_2O）等。在“双碳”战略目标背景下，如何有效减少农业废弃物堆肥过程中的氮素损失并减少温室气体排放，已成为当前研究的关键热点[2]。

近年来，研究发现在堆肥过程中添加酸性添加剂（如硫酸、草酸等）能够显著提高 NH_3 的减排效率，并能增强氮素的保留[3]。然而，添加酸性添加剂不仅会增加成本，也使堆肥工艺更加繁琐。因此，开发一种具有酸性的废弃物作为原料以实现保氮则更具有可操作性和应用前景。

糠醛渣是农业废弃物（如玉米芯、秸秆、稻壳、甘蔗渣）生产糠醛过程中所产生的固体废弃物，年产量约为 2 300 万 t[4]，但目前尚未得到有效处置与利用。糠醛渣含有丰富的木质素（53.18%）和纤维素（39.48%），呈酸性（pH 值通常为 2.0～4.0），具有作为酸性调理剂的潜力，可用于改善碱性土壤等[5-6]。此外，作为工业副产品，糠醛渣就地采购成本仅为每吨数十至数百元，低于常规调理剂，价格优势显著。因此，糠醛渣的应用潜力正逐步受到广泛关注。研究发现，添加 3%～9% 的糠醛渣可有效减少奶牛粪便堆肥中的 NH_3 排放量，减排幅度达到 12.86%～30.82%[7]。添加 10%（以干物质计算）的糠醛渣，可以减少牛粪和小麦秸秆堆肥中 N_2O 的排放。然而，当前尚不清楚添加糠醛渣对堆肥过程中其他温室气体的排放是否存在影响[8]。此外，糠醛渣较高的碳氮比（C/N）是否能够替代秸秆作为堆肥中 C/N 调理剂的作用仍需进一步研究。

初始 C/N 的不同会显著影响堆肥过程中的微生物活性和气体排放特征。基于此，本研究在控制相同初始 C/N 的条件下，通过设置不同的糠醛渣替代玉米秸秆的比例，系统评估该替代方法对鸡粪好氧堆肥过程中气体排放（特别是温室气体）的影响，并探究糠醛渣作为堆肥 C/N 调理剂的可行性，以期为糠醛渣资源化利用及其在堆肥温室气体减排中的应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验所用鸡粪来源于某蛋鸡养殖场，糠醛渣由山东菏泽舜达生物科技有限公司提供，玉米秸秆购自东海县黄川镇曹士江秸秆经营部，风干后切成 2～4 cm。各原料的理化特性如表 1 所示。

表 1 堆肥原料的理化特性

原料	含水率/%	pH	C/%	N/%	C/N
鸡粪	70.00±0.52	7.50±0.08	37.80±0.08	5.32±0.08	7.11±0.12
玉米秸秆	13.00±0.31	6.60±0.10	44.80±0.07	1.53±0.02	29.30±0.28
糠醛渣	51.00±0.67	3.30±0.04	51.10±0.17	0.62±0.02	81.90±1.63

注：含水率和pH均以鲜样计算，C、N和C/N均以干物质含量计算。

1.2 试验设计

本试验使用5个相同的不锈钢堆肥罐进行试验，每个堆肥罐的直径为35 cm、高55 cm，为双层保温体；顶部盖子上配有1个气体收集口和2个排气通风口，每个罐底部均设有带均匀分布的孔径3 mm的不锈钢圆盘，自动曝气系统从下往上曝气。3个温度传感器分别放置在每个堆肥罐的顶部、中部和底部。通过调整玉米秸秆、鸡粪和糠醛渣的比例，共设置5个不同处理（S22、F26、F30、F22、S30），具体见表2。堆肥周期共30 d，每个处理初始体积为堆肥罐容积的80%～85%，初始含水率为60%，连续曝气量以干物质计为0.3 L/（kg·min）。在堆肥前14 d，每天翻堆1次，之后每2 d翻堆1次。每隔1 h分别记录堆肥罐顶部、中部和底部的温度，同时使用温度计记录环境温度，并计算每天堆体温度和环境的平均温度。分别在堆肥的第0、1、5、11、17、24、30天收集约50 g堆肥样品用于测定pH值。在堆肥前14 d每天收集气体，第14天后每2 d收集1次，用于分析CO_2、CH_4和N_2O含量。在堆肥前14 d每天测定1次NH_3排放量，第14天后每2 d测定1次NH_3排放量。

表 2 不同堆肥处理的原料配比及初始C/N值

原料	S22	F26	F30	F22	S30
玉米秸秆/%	27.5	16.0	6.0	16.0	16.0
鸡粪/%	40.0	40.0	40.0	50.0	30.0
糠醛渣/%	0.0	11.5	22.3	6.5	16.5
初始C/N	22	26	30	22	30

1.3 测定方法

1）pH值测定。将新鲜样品与去离子水以1∶10（*w*/*v*）的比例混合。将混合物置于25 ℃恒温振荡仪上150 r/min振荡30 min，3 000 r/min离心30 min后，过滤得到水提取物，使用pH计（FE28-Standard，美国）测定水提取物的pH值。

2）NH_3排放量。密封罐体出气口，留1个排气口并将其置于提前准备好的20 g/L硼酸吸收液中，待吸收30 min后使用0.05 mol/L硫酸进行滴定，并计算每天NH_3的排放量，NH_3的累计排放量由堆肥过程中每天的排放量总计得出。

计算公式：

$$E_{NH_3}=\sum_{i=1}^{j=n}\frac{V\times 2\times c\times 17\times 24}{m\times t\times 1\,000}$$

式中：E_{NH_3}为累计单位质量内NH_3的排放量，g/kg，以干物质计；i为第i天的排放量；j为实际堆肥的总时间，d；V为滴定消耗硫酸的量，mL；c为硫酸的浓度，mol/L；m为堆体的初始干质量，kg；t为每天收集的时间，h；2为硫酸中氢离子的倍数系数；24为每天对应的小时数；17为NH_3的相对分子质量；1 000为L换算为mL的倍数。

3）CO_2、CH_4和N_2O排放量。先用气袋定时收集气体并换算出每天的排气量，然后用真空管收集气体并使用气相色谱仪（7890A, Agilent，美国）测定气体浓度，并计算出每天的排放量，CO_2、CH_4和N_2O的累计排放量由堆肥过程中每天的排放量总计得出。

计算公式：

$$EM=\sum_{i=1}^{j=n}\frac{V\times c\times M\times 86\,400}{m\times t\times 22.4}$$

式中：EM为单位质量内CO_2、CH_4和N_2O的累计排放量，g/kg，以干物质计；i为第i天的排放量；j为实际堆肥的总时间，d；V为集气时间t内的气体体积，L；m为堆体的初始干质量，kg；t为每天每次收集气体的时间，s；M为相关气体的相对分子质量；86 400为每天对应的秒数；22.4为标准状况下1 mol任何理想气体的体积。

1.4 数据处理与分析

采用SPSS 22.0软件和Excel 2020对数据进行处理和分析，使用Origin 2022和Adobe Illustrator 2022创建图表，试验数据采用“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 糠醛渣替代玉米秸秆对堆肥温度和pH的影响

如图1A所示，在堆肥进入第1 d便开始升温，当堆肥进入第4天后所有处理组温度达到50 ℃以上。S22、F26、F30、F22和S30分别在第4、5、5、6、5天达到最高温度（56.04、56.07、57.24、56.17、58.61 ℃），嗜热期分别为3、3、4、5、4 d。

好氧堆肥过程中适宜的pH值为5.5～8.5。由图1B可知，S22、F26、F30、F22和S30堆肥初期的pH值分别为6.92、6.62、6.40、6.87和6.68，均在适宜

的pH值范围内。

可见，随着糠醛渣添加量的增加，其初始pH逐渐降低。而进入嗜热期后，各处理堆肥pH值急剧上升至8.80～9.36，随后略微下降并维持在9.0左右直至堆肥结束。堆肥结束时，S22和S30处理组的pH高于其他3个处理组。

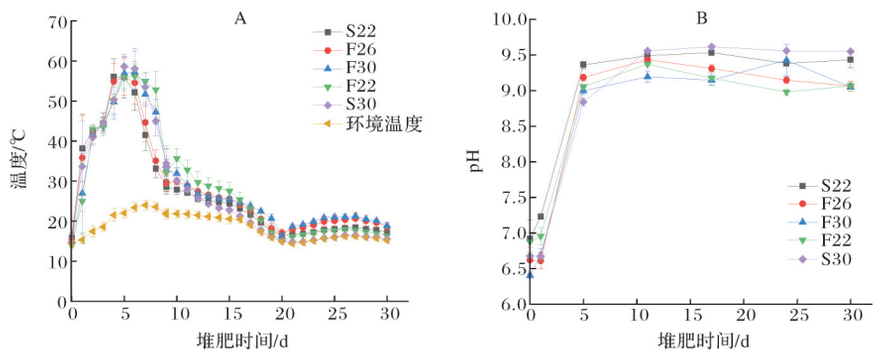


图1　不同处理下堆肥温度(A)和pH值(B)变化

2.2　糠醛渣替代玉米秸秆对堆肥过程中CO_2排放的影响

由图2A可知，各处理在堆肥第1～10天的CO_2排放量较高，其中在第1～3天排放量最高可达到62～104 g/(kg·d)。随着堆肥时间延长，各处理的CO_2排放量逐渐降低并趋于平稳，表明堆肥进入腐熟稳定阶段。由图2B可知，CO_2累计排放量在堆肥前10 d快速增加，随着堆肥时间延长各处理组呈缓慢增加。在堆肥结束时，S22、F26、F30、F22和S30的CO_2累计排放量分别为472、567、557、760、492 g/kg。可见，相同C/N(S22和F22，S30和F30)处理组下，糠醛渣的添加促进了CO_2的排放，且添加糠醛渣后，较低的C/N更容易促进CO_2的排放(F22＞F26＞F30＞S30)。

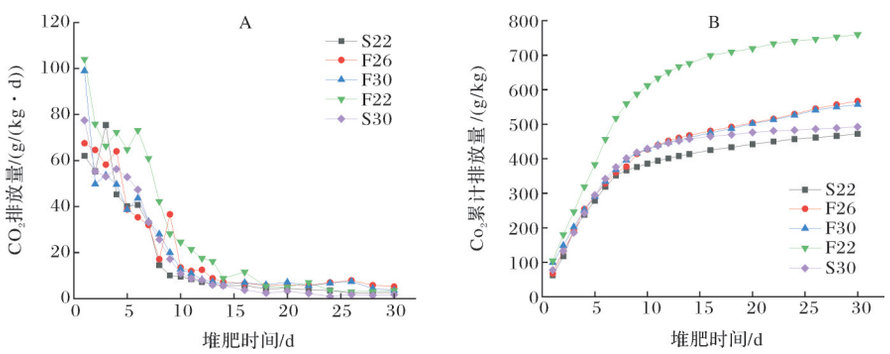


图2　不同处理下堆肥过程中CO_2排放量(A)和CO_2累计排放量(B)的比较

2.3　糠醛渣替代玉米秸秆对堆肥过程中CH_4排放的影响

如图3A所示，各处理组CH_4排放量在堆肥第1天较高(0.003～0.011 g/kg)，随后迅速下降并呈低水平波动，第11天出现小幅回升，而在堆肥进入腐熟期出现短暂的高排放，随后稳定在0.001 g/kg左右。从图3B可以看出，在堆肥结束时，S22、F26、F30、F22和S30的CH_4累计排放量分别为0.073、0.088、0.077、0.084和0.072 g/kg。相同C/N(S22和F22，S30和F30)处理组下，玉米秸秆的使用可以减少CH_4的排放，而糠醛渣的添加促进了CH_4的排放。F22和F30处理的CH_4累计排放量分别较S22和S30处理增加15.01%和7.25%。

2.4　糠醛渣替代玉米秸秆对堆肥过程中N_2O排放的影响

如图4A所示，N_2O排放主要集中在嗜热期，各处理组在堆肥前9 d呈明显波动，其中F22处理第4天达到最高值(0.064 g/kg)，F26处理第9天出现较高N_2O排放(0.044 g/kg)。当堆肥进入冷却期和腐熟期后，N_2O排放明显降低并总体趋于平稳。由图4B可知，在堆肥结束时，S22、F26、F30、F22和S30的N_2O累计排放量分别为0.079、0.147、0.093、0.165和0.039 g/kg。这表明相同C/N(S22和F22，S30和F30)处理下糠醛渣的添加促进了N_2O的排放，F22

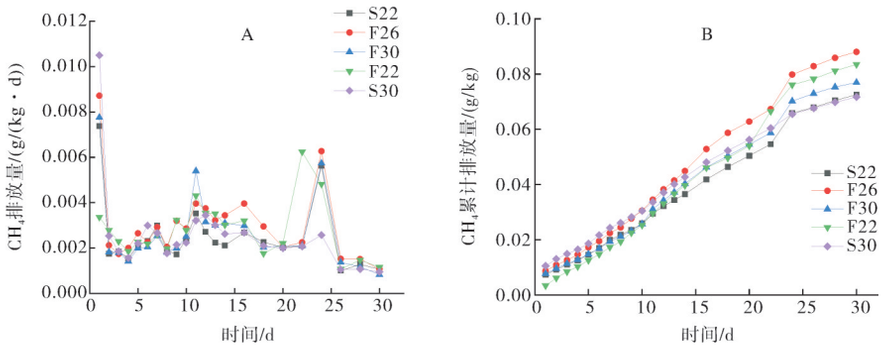


图3 不同处理下堆肥过程中CH_4排放量(A)及其累计排放量(B)的比较

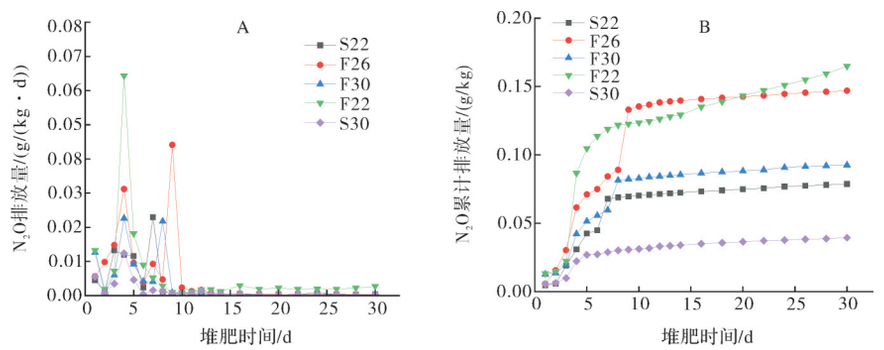


图4 不同处理下堆肥过程中N_2O排放量(A)及其累计排放量(B)的比较

和F30处理的N_2O累计排放量分别较S22和S30处理增加109.65%和134.77%。从累计排放量来看，较低的C/N下添加糠醛渣更容易促进N_2O的排放(F22＞F26＞F30＞S30)。

2.5 糠醛渣替代玉米秸秆对堆肥过程中NH_3排放的影响

由图5A可知，NH_3的排放主要集中在嗜热期，各处理组排放量自第4天开始快速升高，并于第6～7天达到较高水平，峰值为0.045～0.143 g/kg。随后，NH_3排放总体呈下降趋势，当堆肥进入冷却期和腐熟期后微生物活性减弱，NH_3的排放逐渐降低。由图5B可知，在堆肥结束时，S22、F26、F30、F22和S30的NH_3累计排放量分别为1.38、1.12、0.919、0.359和1.38 g/kg。其中，F22的NH_3排放量最低，而S22和S30的NH_3排放量最高。可见，在相同C/N处理组(S22与F22，S30与F30)下，添加糠醛渣显著降低了NH_3累计排放量。在C/N为22和30的条件下，NH_3累计排放量分别减少了73.98%和33.41%。

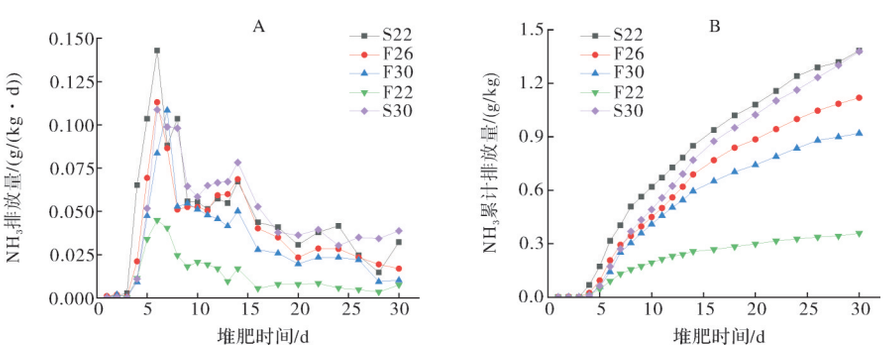


图5 不同处理下堆肥过程中NH_3排放量(A)及其累计排放量(B)的比较

2.6 糠醛渣替代玉米秸秆堆肥对全球变暖潜势的影响

CO_2、CH_4和N_2O是典型的温室气体，以CO_2排放当量计算各处理的累计全球变暖潜势(global warming potential, GWP)。由表3可知，不添加糠醛渣的S22处理组的CO_2当量值最低(497 g/kg)，F22的CO_2当量值最高(811 g/kg)；添加糠醛渣后，整体表现为随着C/N的增加，CO_2当量逐渐降低(S30＜

F30＜F26＜F22）。但 CO_2 当量并不是随着糠醛渣添加比例的增加而增加，S30 处理组（16.0% 的玉米秸秆和 16.5% 的糠醛渣）具有与 S22（不添加糠醛渣）相当的 CO_2 排放当量，且 F26 和 F30 处理组的 CO_2 当量远低于 F22。

表 3　不同处理下堆肥过程中温室气体累积排放量及 CO_2 当量　　g/kg

指标	S22	F26	F30	F22	S30
CO_2	472	567	557	760	492
CH_4	0.073	0.088	0.077	0.084	0.072
N_2O	0.079	0.147	0.093	0.165	0.039
CO_2 当量	497	613	587	811	506

注：CO_2、CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势（GWP）系数分别取 1、23 和 298，CO_2 当量（CO_2-eq）按各温室气体排放量与相应 GWP 系数的乘积之和计算。

3　讨　论

温度和 pH 都是衡量堆肥腐熟的重要标准。然而，在堆肥过程中较低的环境温度增加了热量散失，进而引起嗜热期维持较短。此外，研究发现秸秆类原料可以有效提高堆肥孔隙度[9]，但同时也会导致热量损失加快。与小麦秸秆相比，糠醛渣和鸡粪的粒径较小。结合不同处理的温度变化可以看出，糠醛渣添加量较高的处理维持嗜热期的时间相对较长。在堆肥初期，微生物大量繁殖并分解含氮有机物，引起有机氮的氨化和矿化，使 pH 迅速升高；而随着 NH_3 排放以及有机质降解和有机酸的生成，引起 pH 下降[10]。本研究发现，添加糠醛渣可以降低堆肥初始 pH，并在堆肥过程中使 pH 也维持较低水平。综上所述，添加糠醛渣有利于降低堆体的 pH，并通过减少热量散失以延长嗜热期。

微生物在堆肥过程中发挥重要作用，随着微生物的快速生长繁殖，加速了有机质的分解，并形成 CO_2 等气体。因此，CO_2 排放量也反映了堆肥过程中微生物的活性、有机物降解和堆肥效率[11]。李艳春等[12]研究表明，CO_2 累计排放量会随着 C/N 的增加而降低，本研究未发现相同的现象，可能是因为糠醛渣的添加改变了堆肥 pH 值，进而影响微生物对有机质的分解。F22 的累计排放量最高，这与其嗜热期最长有关，因为较高的微生物活性会加速有机质分解并促进 CO_2 的排放，而 S22 较低与其嗜热期最短有关[13]。综上所述，添加糠醛渣通过延长嗜热期并促进微生物对有机质的分解提高了 CO_2 的排放。此外，有机质的分解消耗堆体中的氧气而形成厌氧区，并诱导产甲烷菌的活性[14]，进而引起 CH_4 排放增加。相比于玉米秸秆，糠醛渣减少了堆肥孔隙度并增加厌氧区，从而增加 CH_4 的排放。

NH_3 和 N_2O 是堆肥过程中氮损失的重要途径，其中 NH_3 约占氮损失的 21%～77%[15]，N_2O 约占氮损失的 0.2%～9.9%[16]。从本研究结果来看，N_2O 和 NH_3 的累计排放量分别为 0.039～0.165 g/kg 和 0.359～1.38 g/kg。可见，NH_3 排放量远高于 N_2O，进一步表明堆肥过程中 NH_3 排放是造成氮损失的主要途径。堆肥过程中氮的转化是氨化、硝化、反硝化和固氮作用之间相互作用的结果[17]。就 NH_3 排放而言，嗜热期微生物促进含氮有机物分解形成铵态氮，而铵态氮在高温高 pH 条件下容易挥发成 NH_3[18]。就 N_2O 排放而言，N_2O 生成主要集中在冷却腐熟期和嗜热期[19-20]，这主要是因为嗜热期微生物快速分解含氮有机物形成铵态氮和硝态氮，堆体内部形成局部厌氧环境，硝态氮通过反硝化作用进一步生成 N_2O[19]。

本研究中糠醛渣的添加对上述 2 种气体排放产生了差异化影响。一方面，糠醛渣的添加降低了堆体的 pH 值，抑制了 NH_3 的挥发，从而实现减排[3]；另一方面，pH 降低抑制了 N_2O 还原酶的活性，削弱了反硝化细菌将 N_2O 还原为 N_2 的能力，因而促进了 N_2O 的排放[1]，这一结果也与低 C/N 比更容易促进 N_2O 排放的结论相符[21]。因此，使用糠醛渣替代玉米秸秆用于堆肥，虽然有利于减少 NH_3 损失，但具有增加 N_2O 排放的风险。值得注意的是，本研究结果与李云等[8]报道的糠醛渣添加促进 NH_3 排放，但减少 N_2O 排放的结论相反。这一差异可能归因于糠醛渣添加比例的不同：本研究糠醛渣的添加比例更大，导致初始 pH 降幅更为显著，pH 的较大变化可能改变了氮素转化途径的主导方向，因而导致结论不一致。

CH_4 的 GWP 是 CO_2 的 23 倍，而 N_2O 则高达 298 倍[22]。本研究中，CO_2 排放对 GWP 的贡献在各处理中均占主体地位，而 CH_4 贡献值可忽略不计。F22 处理的 N_2O 贡献值较 S22 增加了 109.4%，致使 F22 的 GWP 最高。添加糠醛渣的处理随 C/N 升高，GWP 呈下降趋势（F22＞F26＞F30），表明提高 C/N 可部分抵消糠醛渣添加对 GWP 的负面效应。糠醛渣添加比例过高时，N_2O 增加导致 GWP 显著升高，而适当提高 C/N 并控制替代比例，可在利用糠醛渣的同时避免 GWP 大幅增加。综合 GWP 分析结果，

本研究建议在C/N≥26时，可适当添加部分糠醛渣替代玉米秸秆进行好氧堆肥。

4 结 论

糠醛渣作为一种高C/N和低pH值的农业废弃物，其替代玉米秸秆用于鸡粪好氧堆肥可以有效减少堆肥过程中NH_3的排放；在相同C/N条件下，F22和F30处理的NH_3累计排放量分别较S22和S30处理降低73.98%和33.41%。添加糠醛渣会增加堆肥过程中温室气体的排放，而当初始C/N≥26时，添加糠醛渣导致的CO_2排放当量相对较低。因此，建议在C/N≥26的情况下，可以使用糠醛渣替代少部分玉米秸秆。然而，糠醛渣添加影响温室气体排放的调控机理还需通过物质代谢和宏基因组等手段进行深入研究。

参 考 文 献

[1] Wang N Y, He Y, Zhao K Q, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: a review[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2024, 354: 120337. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120337.

[2] 薛文涛，张玲，孙昊，等. 草酸不同添加方式对堆肥氮素损失控制效果研究[J]. 中国土壤与肥料，2023(5)：54-59.

[3] Pan J T, Cai H Z, Zhang Z Q, et al. Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction [J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 467-475.

[4] Ren S X, Qu X, Zhang X Q, et al. Valorization of biomass furfural residue: Nitrogen-doped porous carbon towards electrocatalytic reaction[J/OL]. Industrial Crops and Products, 2023, 193: 116251. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116251.

[5] 李梦雨，杨鹏，常春，等. 糠醛渣高值化利用的研究进展[J]. 林产化学与工业，2021，41(6)：117-126.

[6] 曲霞，任素霞，李政，等. 糠醛渣基木质素/纤维素复合材料的表征及氧还原电催化性能[J]. 吉林大学学报(理学版)，2024，62(1)：156-164.

[7] 汤莹，赵旭，李娟，等. 糠醛渣添加量对奶牛粪堆肥腐熟及氨气释放量的影响[J]. 寒旱农业科学，2023(6)：579-583.

[8] 李云，邱慧珍，张建斌，等. 添加过磷酸钙和糠醛渣对好氧堆肥过程中氨气排放和氮素转化的影响[J]. 环境工程学报，2021，15(12)：3992-4000.

[9] 许淑妮，冯晓璐，陈延玲，等. 添加玉米秸秆对胡萝卜尾菜堆肥过程的影响[J]. 农业工程学报，2023，39(11)：230-237.

[10] Ren X N, Wang Q, Awasthi M K, et al. Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission[J/OL]. Bioresource Technology, 2019, 286: 121377. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2019.121377.

[11] Sánchez-García M, Alburquerque J A, Sánchez-Monedero M A, et al. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions[J]. Bioresource Technology, 2015, 192: 272-279.

[12] 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(S2)：279-284.

[13] Sun J Z, Wang G, Liu H L, et al. Influence of thermally activated peroxodisulfate pretreatment on gaseous emission, dissolved organic matter and maturity evolution during spiramycin fermentation residue composting[J/OL]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127964. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127964.

[14] Zhang L X, Gao X Z, Li Y M, et al. Optimization of free air space to regulate bacterial succession and functions for alleviating gaseous emissions during kitchen waste composting[J/OL]. Bioresource Technology, 2023, 387: 129682. https://doi. org/10.1016/j.biortech.2023.129682.

[15] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 838-844.

[16] Lu Y S, Gu W J, Xu P Z, et al. Effects of sulphur and *Thiobacillus thioparus* 1904 on nitrogen cycle genes during chicken manure aerobic composting[J]. Waste Management, 2018, 80: 10-16.

[17] 李松蓉，彭璧辉，徐少奇，等. 堆肥过程氨气、硫化氢协同减排研究进展[J]. 农业资源与环境学报，2024，41(2)：431-441.

[18] Li H K, Zhao Z X, Shi M L, et al. Metagenomic binning analyses of swine manure composting reveal mechanism of nitrogen cycle amendment using Kaolin[J/OL]. Bioresource Technology, 2024, 393: 130156. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130156.

[19] Liu Y, Ma R N, Li D Y, et al. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer, biochar and spent mushroom substrate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2020, 267: 110649. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110649.

[20] 周新伟，吕志伟，金梅娟，等. 不同碳氮比牛粪对基质化堆肥中温室气体排放和理化性质的影响[J]. 江苏农业科学，2024，52(13)：260-266.

[21] Li D Y, Manu M K, Varjani S, et al. Mitigation of NH_3 and N_2O emissions during food waste digestate composting at C/N ratio 15 using zeolite amendment[J/OL]. Bioresource Technology, 2022, 359: 127465. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127465.

[22] Zhang L L, E R, Ali M M, et al. Livestock and poultry manure management from the perspective of carbon neutrality in China[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2023, 10(3): 341-362.

【责任编辑：胡 敏】