

不同添加料对羊粪堆肥腐熟进程及氨气和硫化氢释放量的影响

杨昆山, 穆永松, 王 刚
(甘肃华瑞农业股份有限公司, 甘肃 张掖 734500)

摘要: 为了解决过磷酸钙、硫酸镁等尾矿废弃物堆积的问题, 合理提升畜禽粪污堆肥的固碳减排潜力和有机肥品质, 降低堆肥添加剂成本, 为畜禽粪污资源化利用与可持续农业发展提供理论依据和实践参考。以羊粪和小麦秸秆为主要原料, 进行为期 50 d 的堆肥试验, 探究了过磷酸钙和硫酸镁对羊粪条垛式堆肥腐熟进程及氨气、硫化氢释放量的影响, 监测了堆肥堆体温度、pH、含水率、种子发芽指数(GI)和碳氮比(C/N)等关键参数以及堆肥的氨气(NH_3)和硫化氢(H_2S)气体释放速率。结果表明, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙能够加快羊粪堆体升温速度, 延长高温持续时间, 降低堆体 pH、含水率、C/N, 并提高种子发芽指数, 使堆肥腐熟度明显提高。同时, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙, 有效减少了氨气和硫化氢的释放, 平均释放速率分别降低了 20.84%、18.24%, 显著改善了氮素保持与气态污染控制效果。综上所述, 羊粪堆肥时, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙, 可促进堆肥物料的分解转化, 加快腐熟速度, 降低氨气和硫化氢的释放量。

关键词: 羊粪堆肥; 过磷酸钙; 硫酸镁; 堆肥; 氨气; 硫化氢

中图分类号: S141

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)08-0768-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.08.014

Effects of Different Additives on the Maturity Process and the Emissions of Ammonia and Hydrogen Sulfide during Sheep Manure Composting

YANG Kunshang, MU Yongsong, WANG Gang
(Gansu Huarui Agriculture Co., Ltd., Zhangye Gansu 734500, China)

Abstract: To address the issue of tailing waste accumulation from materials such as superphosphate and magnesium sulfate, reasonably enhance the carbon sequestration and emission reduction potential as well as the quality of organic fertilizer in livestock and poultry manure composting, and to reduce the cost of compost additives, this study aimed to provide both theoretical basis and practical reference for the resource utilization of livestock and poultry manure and the sustainable development of agriculture. Using sheep manure and wheat straw as the main raw materials, a 50-day composting experiment was conducted to investigate the effects of superphosphate and magnesium sulfate on the maturity process of sheep manure windrow composting and on ammonia (NH_3) and hydrogen sulfide (H_2S) emissions. Key parameters monitored included compost pile temperature, pH, moisture content, seed germination index (GI), and carbon-to-nitrogen ratio (C/N), as well as the emission rates of NH_3 and H_2S . Results showed that adding 1% (w/w) superphosphate accelerated the heating rate of the compost pile, prolonged the high-temperature duration, reduced pH, moisture content, and C/N ratio, and improved the seed germination index, significantly enhancing compost maturity. Furthermore, the addition of 1% superphosphate effectively reduced the emissions of NH_3 and H_2S , with the average emission rates decreasing by 20.84% and 18.24%, respectively, thereby markedly improving nitrogen retention and gaseous pollution control. In conclusion, during sheep manure composting, adding 1% superphosphate can promote the decomposition and transformation of compost materials, accelerate maturity, and reduce the emissions of ammonia and hydrogen sulfide.

Key words: Sheep manure compost; Superphosphate; Magnesium sulfate; Compost; Ammonia; Hydrogen sulfide

近年来, 我国养殖业持续朝着集约化、专业化、规模化方向迈进^[1]。在此过程中, 畜禽粪污产量大幅增加, 对空气、土壤和水体带来了污染。若能对畜禽粪污加以合理利用, 不仅能减少环境污染, 还能实现资源循环利用^[2]。堆肥技术作为

传统的废弃物无害化处理手段, 已广泛应用于各类畜禽粪污和蔬菜废弃物的处理。堆肥发酵过程中产生的高温, 能有效杀灭病原微生物, 实现各类畜禽粪污的无害化处理, 并将其转化为农业生产所需的重要肥料, 因此, 堆肥是各类畜禽粪污

收稿日期: 2025-04-29; 修订日期: 2025-05-10

作者简介: 杨昆山(1981—), 男, 甘肃民乐人, 高级工程师, 主要从事土壤培肥等方面的研究与示范推广工作。Email: 1793706757@qq.com。

和蔬菜废弃物无害化处理及肥料化再利用的有效途径。然而, 诸多研究表明, 堆肥过程是温室气体重要排放源之一^[3], 在堆肥过程中会产生大量 NH_3 和 H_2S 等物质, 不仅会对周围环境造成一定程度的污染^[4-5], 还会降低肥料的品质^[6-7]。如何减少堆肥过程带来的环境污染和氮素损失, 已成为国内外研究热点。我国尾矿废弃物年产量巨大, 但利用效率低下。传统上尾矿主要用于矿山井下充填和矿山植被复垦等, 这极易导致大量尾矿囤积, 进而造成环境污染。但尾矿中通常含有对植物生长有益的元素, 如过磷酸钙、硫酸镁等。因此, 若能将尾矿残渣与畜禽粪便堆肥相结合, 不仅能解决过磷酸钙、硫酸镁等尾矿废弃物堆积的问题, 还能提升畜禽粪污堆肥的固碳减排潜力和有机肥料产品品质, 降低堆肥添加剂成本。

在畜禽粪便堆肥过程中, 添加过磷酸钙以提高堆肥产品磷含量、降低堆肥过程中氮素损失的研究已有较多报道^[8-9], Li 等^[10]研究表明, 在堆肥中添加过磷酸钙可减少猪粪堆肥中的碳损失。罗一鸣等^[11]研究发现, 在猪粪堆肥中添加过磷酸钙可降低堆肥过程中的氨气损失; 林小凤等^[12]研究发现, 在堆肥原料中添加过磷酸钙可减少总氮的损失; 杨岩等^[13]研究表明, 在蔬菜废弃物中添加过磷酸钙, 可提高堆体温度、种子发芽指数和降低堆料的 pH 等。过磷酸钙一方面能在堆肥过程中将无机磷素转化为有机磷形态, 大大减少了直接向土壤中施用磷肥导致的磷素固定作用; 另一方面, 过磷酸钙呈酸性, 可减少氨的挥发, 同时产生的铵离子能与过磷酸钙发生化学反应, 生成磷酸铵, 从而将氮素固定下来^[14-15]。但目前, 关于添加过磷酸钙和硫酸镁对羊粪堆肥腐熟过程及氨气和硫化氢释放量影响的研究较少。因此, 本研究以新鲜羊粪和小麦秸秆为主料, 研究添加过磷酸钙和硫酸镁对羊粪条垛式堆肥过程中温度、含水率、种子发芽指数、pH 及氨气 (NH_3) 和硫化氢 (H_2S) 释放量的影响, 旨在为进一步优化羊粪堆肥技术工艺提供科技支撑, 为畜禽粪污资源化利用与可持续农业发展提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用堆肥原料为新鲜羊粪 (含有机碳

435.8 g/kg、全氮 18.3 g/kg、水分 672.6 g/kg, C/N 为 23.81, pH 9.07) 由甘肃华瑞农业股份有限公司万只种羊场提供, 小麦秸秆 (含有机碳 487.1 g/kg、全氮 5.3 g/kg、水分 936.7 g/kg, C/N 为 152.3, pH 7.14), 由甘肃华瑞农业股份有限公司试验基地提供, 普通过磷酸钙 (含 P_2O_5 16%) 购自张掖市甘州区金麟复合肥厂, 硫酸镁 (分析纯) 购自四川冰飞科技有限公司。

1.2 试验方法

试验共设 4 个处理, 分别为: CK, 羊粪 20 t + 小麦秸秆 300 kg; 处理 1, 羊粪 20 t + 小麦秸秆 300 kg + 质量分数为 1% 的过磷酸钙; 处理 2, 羊粪 20 t + 小麦秸秆 300 kg + 质量分数为 0.5% 的过磷酸钙 + 质量分数为 0.5% 的硫酸镁; 处理 3, 羊粪 20 t + 小麦秸秆 300 kg + 质量分数为 1% 的硫酸镁, 3 次重复。每处理将羊粪、小麦秸秆和设计用量的过磷酸钙、硫酸镁充分混合均匀, 采用条垛式堆肥发酵, 堆体长 20.0 m、宽 2.5 m、高 1.4 m。堆肥周期为 50 d, 每天用精密水银温度计检测堆料中心处温度。分别于堆肥第 0、10、20、30、40、50 天采用 5 点采样法采样, 每次采样前将堆体进行翻堆, 翻堆后每次取样 200 g 用于测定理化指标, 其中 100 g 堆料风干粉碎后过 1 mm 筛后贮存用于测定有机碳、全氮含量, 100 g 堆料用于测定含水率、种子发芽指数 (GI) 和 pH^[16-17]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 温度及理化指标 温度、含水率、pH、有机碳、全氮的检测参考汤莹等^[16]、李红霞等^[17]的方法进行, 并计算 C/N。种子发芽指数 (GI) 的检测参照汤莹等^[16]的方法进行。

$$\text{GI} = [(\text{堆料浸提液的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{去离子水的种子发芽率} \times \text{种子根长})] \times 100\%$$

1.3.2 NH_3 和 H_2S 释放量 NH_3 和 H_2S 释放量的检测参照赵晨阳等^[18]的方法进行, 每 5 d 测 1 次。

1.4 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行统计分析及作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对堆体温度的影响

温度是堆肥过程中微生物新陈代谢能力强弱的重要指标, 温度的高低和高温持续时间严重影

响着堆肥效果^[16]。各处理的堆体温度变化如图 1 所示,随着堆肥时间的延长,堆体温度呈现出先上升后下降的趋势反复出现的态势。CK、处理 1 分别在第 5 天、第 3 天进入高温阶段 ($>50^{\circ}\text{C}$),维持高温的天数分别为 37、39 d;处理 2、处理 3 均于第 4 天进入高温阶段 ($>50^{\circ}\text{C}$),维持高温的天数均为 38 d;处理 1、处理 2、处理 3 维持高温天数分别较 CK 增加 2、1、1 d。

2.2 不同处理对堆体含水率的影响

水分是堆肥微生物的生长繁殖和新陈代谢不可或缺的因素,堆肥过程中是通过水分的蒸发来释放热量和调节温度^[16]。不同处理的堆体含水率变化如图 2 所示,随堆肥时间延长,堆体含水率呈逐渐递减趋势,且处理 1、处理 2、处理 3 的堆体含水率下降速度均快于 CK,其中以处理 1 的堆体含水率下降最快,分别在第 10、20、30、40、50 天较 CK 下降 1.24、4.23、3.77、3.79、3.68 个百分点(图 2 a)。堆肥结束后,以处理 1 的堆体含水

率最低,仅为 40.14%,明显低于其他处理(图 2 b)。

2.3 不同处理对堆体 pH 的影响

不同处理的 pH 变化趋势基本一致,均呈先缓慢上升后略有下降趋势,堆肥第 30 天,各处理的堆料 pH 均达到最大值;堆肥第 30 天后,各处理的堆料 pH 开始缓慢下降。处理 1、处理 2、处理 3 的堆体 pH 较 CK 均有不同程度降低,但差异不明显,其中以处理 1 降幅最大,且处理 1 的堆体 pH 在整个堆肥期间,均低于 CK 和其他各处理(图 3 a)。堆肥结束后,以处理 1 的堆体 pH 均低于其他处理,但差异不显著(图 3 b)。

2.4 不同处理对种子发芽指数的影响

发芽指数是衡量堆肥腐熟程度的重要指标,其不仅可以指示堆料对植物种子的毒性随堆肥时间增加的变化趋势,而且也反映了堆料的腐熟进程^[16]。堆肥过程中,各处理的种子发芽指数呈逐渐升高的趋势,但不同的堆肥时间阶段,升高速率有所不同。各处理的堆料在第 10 天时的种子发

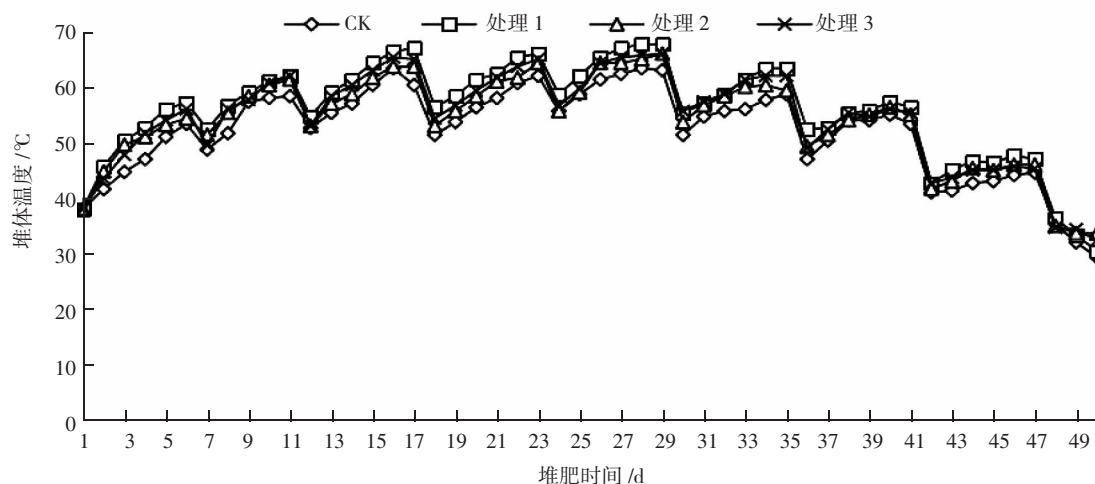


图 1 不同处理的堆体温度变化

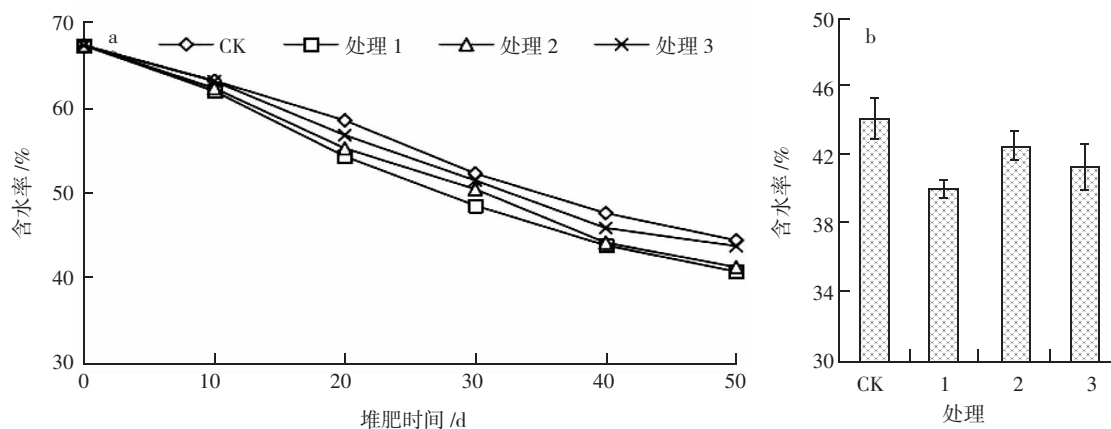


图 2 不同处理的含水量变化

芽指数仅处理 1 高于堆肥开始阶段, 其余各处理均低于堆肥开始; 在第 20、30、40、50 天时种子发芽指数逐步上升, 且处理 1 的种子发芽指数均高于 CK 和其他各处理 (图 4 a)。堆肥结束后, 处理 1、处理 2、处理 3 的种子发芽指数较 CK 分别提升了 8.66、5.87、7.78 个百分点(图 4 b)。

2.5 不同处理对 C/N 的影响

堆料的 C/N 是影响堆肥腐熟速度的重要理化指标, C/N 过高或过低都影响堆肥腐熟速度, 从而

降低堆肥质量^[16]。从图 5 可以看出, 不同处理对堆肥的 C/N 影响较大, 处理 2 和 CK 的 C/N 均呈先缓慢上升后缓慢下降的趋势, 堆肥前 10 d C/N 缓慢上升, 第 10~50 天 C/N 呈缓慢下降趋势。处理 1、处理 3 堆肥的 C/N 均呈缓慢下降的趋势直至堆肥结束(图 5 a)。堆肥结束时, CK、处理 1、处理 2、处理 3 的 C/N 分别为 23.81、18.30、19.72、20.73, 较初始 C/N 分别下降了 1.08%、8.77%、10.61%、5.99%。与 CK 相比, 堆肥结束时, 处理

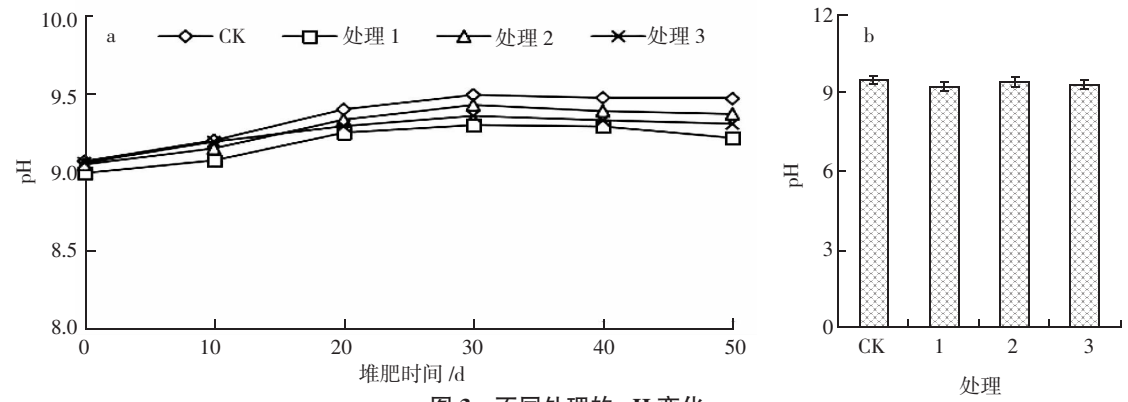


图 3 不同处理的 pH 变化

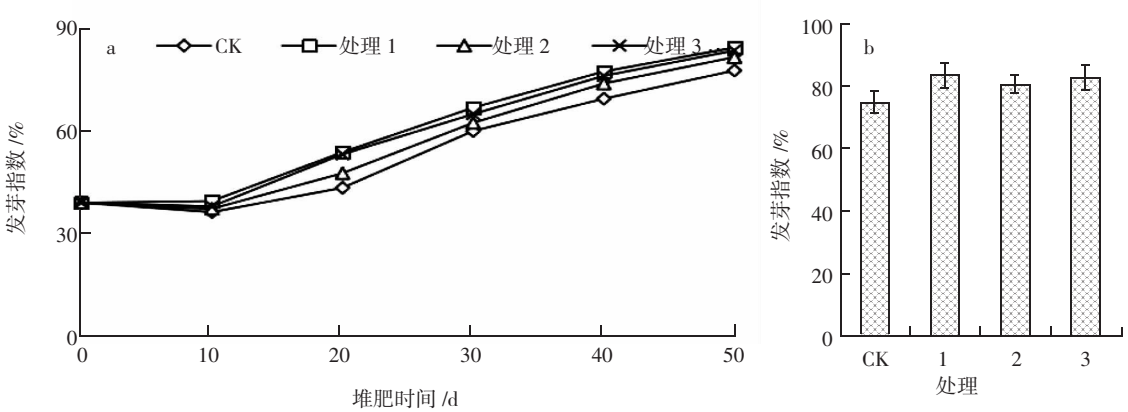


图 4 不同处理的种子发芽指数变化

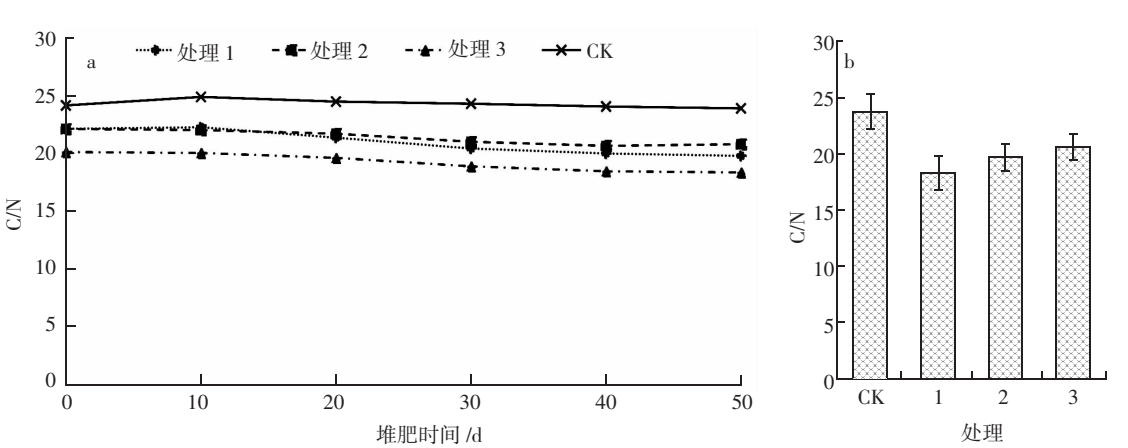


图 5 不同处理 C/N 的变化

1、处理 2、处理 3 堆肥的 C/N 均低于对照处理，分别降低 23.14%、17.18%、12.94%(图 5b)。

2.6 不同处理对 NH_3 和 H_2S 释放量的影响

2.6.1 不同处理对 NH_3 释放量的影响 从图 6 可以看出，在整个堆肥时期，各处理后 NH_3 释放速率均呈先增加后降低的趋势，其中在堆肥第 25 天时，各处理的堆料 NH_3 释放速率均达到最大值；堆肥第 25 天后，各处理的堆料 NH_3 释放速率开始下降。整个堆肥时期 NH_3 释放速率由大到小依次表现为 CK、处理 2、处理 3、处理 1，且处理 1、处理 2、处理 3 的 NH_3 平均释放速率均低于 CK，降幅分别为 20.84%、6.90%、15.25%。

2.6.2 不同处理对 H_2S 释放浓度的影响 从图 7 可以看出，在整个堆肥时期，各处理的 H_2S 释放速率呈先增加后降低的趋势，其中在堆肥第 30 天时，各处理的堆料 H_2S 释放速率均达到最大值；堆肥第 30 天后，各处理的堆料 H_2S 释放速率开始下降。整个堆肥时期 H_2S 的释放速率由大到小依次表现为 CK、处理 3、处理 2、处理 1。整个堆肥时期处理 1、处理 2、处理 3 的 H_2S 平均释放速率均低于 CK，降幅分别为 18.24%、13.52%、

5.24%。

3 讨论与结论

堆体温度、pH、含水率、种子发芽指数、C/N 是评价堆肥腐熟度的重要指标^[18]。堆体内部温度变化情况不仅可以直接反映堆内微生物的活动强度，而且温度是堆肥无害化的重要标志^[19]。研究表明，在堆肥时添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙处理的堆体温度较其他处理更快进入高温阶段，且高温持续时间明显长于其他处理。这与杨岩等^[13]的研究结果一致，这可能是由于添加过磷酸钙后堆体中可利用的磷含量增加，为堆体内部微生物提供了更丰富的营养环境，从而增强了微生物的活性^[20]。微生物活性增强后，其代谢活动更加旺盛，产生的热量也相应增加，导致堆体温度升高较快，并且能够维持较长时间的高温状态。添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙后，堆体的 pH、含水率和 C/N 均降低，而种子发芽指数却得以提高。这是由于过磷酸钙呈酸性，其主要成分如 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 在水中会发生电离，释放出氢离子，从而导致堆体 pH 下降^[21]。过磷酸钙调节后的 pH 更有利于参与有机质分解和养分转化的微生物的

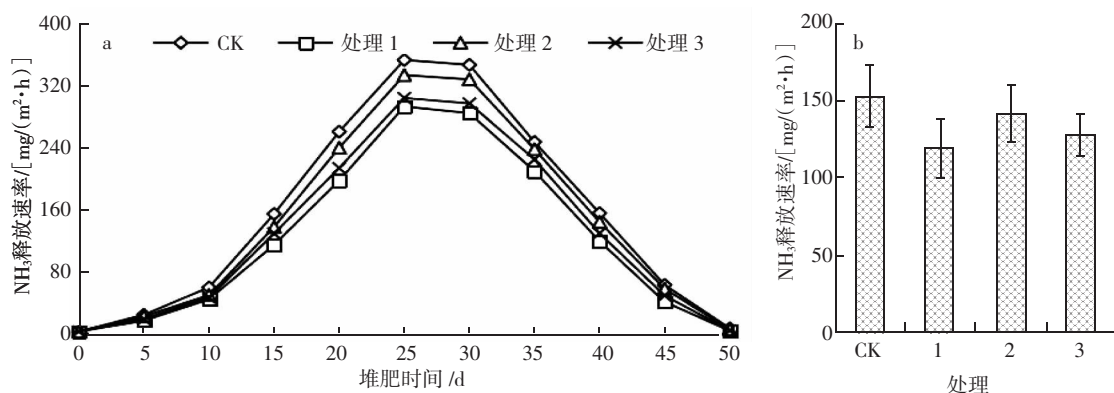


图 6 不同处理 NH_3 释放速率的变化

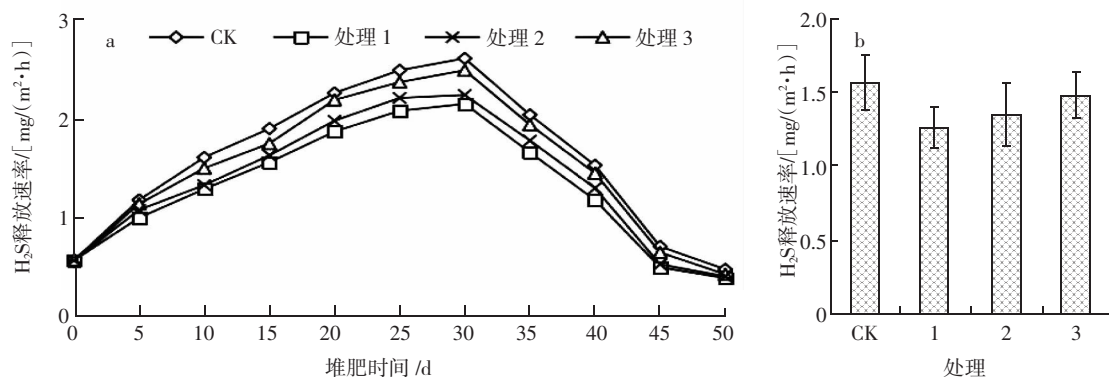


图 7 不同处理 H_2S 释放速率的变化

生长, 进而促进堆肥过程的进行^[22-23]。添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙的处理后堆体含水率较无添加料对照下降 3.68 个百分点。这是由于添加过磷酸钙后堆体温度高于其他处理, 在高温条件下, 堆体中的水分以水蒸气的形式散失到周围环境中, 导致堆体含水率降低。较低的含水率可以改善堆体的通气性, 有利于氧气的扩散, 为好氧微生物提供充足的氧气, 促进其生长和代谢, 进一步推动堆肥过程。堆肥结束后, 添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙的处理与无添加料对照相比, 堆料的种子发芽指数提高最多, 达 8.66 个百分点。这是由于一方面过磷酸钙的添加增加了堆体中的营养物质, 除了提供磷元素外, 过磷酸钙中的钙、硫等元素以及其分解产物也可能对植物生长有益, 这些营养物质为种子萌发提供了良好的条件, 有利于种子发芽和幼苗生长; 另一方面是由于过磷酸钙可能还通过调节堆体的理化性质, 如改善通气性、降低有害物质含量等, 间接促进了种子发芽指数的提高。

在整个堆肥过程中氨气和硫化氢气体在添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙的处理中释放速率均低于其他各处理, 平均释放速率较无添加料对照分别降低 20.84%、18.24%。这与李云等^[24]的研究结果一致。原因可能是, 首先, 过磷酸钙中的 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 能够与铵根离子发生阳离子交换作用。铵根离子被交换到过磷酸钙的晶体结构中, 转化为稳定的酸性磷酸铵或硫酸铵等物质^[25], 这些化合物具有较低的溶解度和挥发性, 能够将氮素固定在堆体中, 减少了氨气的挥发。其次, 过磷酸钙的酸性特性使堆体 pH 缓慢下降。在较低的 pH 环境下, 铵根离子更容易与钙离子、镁离子等结合, 生成不易向铵态氮转化的结晶物质 $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ^[26]。同时, 较低的 pH 还抑制了硝化作用, 减少了硝态氮的生成, 从而降低了氨气通过硝化-反硝化途径产生的可能性。最后, 堆肥过程中的高温对氨气的排放具有多方面的抑制作用。高温会抑制蛋白酶和脲酶的活性, 这 2 种酶在有机氮的分解和转化过程中起着重要作用^[27]。酶活性降低导致有机氮的分解速率减慢, 减少了氨气的产生。此外, 高温还会降低氨化细菌的丰度, 氨化细菌是将有机氮转化为铵态氮的关键微

生物, 其数量减少直接导致 NH_3 产生量降低。同时, 高温加速了腐殖化进程, 促进了含氮腐殖物质的形成。这些含氮腐殖物质结构稳定, 能够固定氮素, 减少了氮素的流失^[28]。然而, 堆肥过程中的 H_2S 主要在堆体的厌氧区域形成。堆体内硫酸盐、亚硫酸盐等含硫化合物在厌氧条件下, 通过还原作用产生 S^{2-} , S^{2-} 再与水中的氢离子结合, 通过水解作用形成 H_2S ^[29]。添加质量分数为 1.0% 的过磷酸钙后, 由于过磷酸钙呈酸性, 在一定程度上改变了堆体的微环境, 抑制了有机物的分解。有机物分解速率减慢导致含硫化合物的还原反应受到抑制, 从而降低了 H_2S 的排放。综上, 在羊粪堆肥过程中, 添加 1% 的过磷酸钙磷不仅能够提高羊粪腐熟效率和堆肥质量, 而且可有效降低氨气、硫化氢的释放和氮素损失。因此, 过磷酸钙在提高畜禽粪污处理的环境效益及其循环利用方面意义重大。

本研究探讨了在羊粪堆肥过程中添加 1% 过磷酸钙对堆肥性能和环境效益的影响, 结果表明, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙能够加快羊粪堆体升温速度, 延长高温持续时间, 降低堆体 pH、含水率、C/N, 并提高种子发芽指数, 使堆肥腐熟度明显提高。同时, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙, 有效减少了氨气和硫化氢的释放, 平均释放速率较无添加料对照降低了 20.84%、18.24%, 显著改善了氮素保持与气态污染控制效果。综上所述, 羊粪堆肥时, 添加质量分数为 1% 的过磷酸钙可促进堆肥物料的分解转化, 加快腐熟速度, 降低氨气和硫化氢释放量。过磷酸钙的添加能够显著促进堆体温度快速升高并延长高温持续时间, 优化堆体 pH 和含水率, 降低 C/N 比, 同时提升种子发芽指数。添加 1% 过磷酸钙不仅有利于提升羊粪堆肥的腐熟效率和成品质量, 同时能够有效控制氮素流失及气态污染物排放, 具有重要的环境效益和应用推广价值。

参考文献:

- [1] 于 杰, 王明利. 中国畜牧业现代化研究进展与未来展望[J/OL]. 中国农业资源与区划, 1-10. (2024-08-29)[2025-03-11]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20240828.1723.002>.
- [2] 李彬辉, 杨小毛, 梅立永, 等. 畜禽养殖业粪污处理及资源化利用[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(2):

- 58–60.
- [3] JINSHAN L, ZUBIN X, GANG L, et al. A holistic evaluation of CO₂ equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 177–185.
 - [4] REN X N, WANG Q, ZHAO J C, et al. The effect of Ca-bentonite on spectra of dissolved organic matter during pig manure composting[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(6): 1856–1862.
 - [5] 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.
 - [6] EGHBALL B, POWER J F, GILLEY J E, et al. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 189–193.
 - [7] CRONJÉ A L, TURNER C, WILLIAMS A G, et al. The respiration rate of composting pig manure[J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(2): 119–129.
 - [8] 吕少康, 黄欣悦, 叶 静, 等. 尾矿残渣对猪粪堆肥质量及碳转化固存的影响[J/OL]. *环境科学*, 1–20. (2025-03-10)[2025-03-12]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202411148>.
 - [9] 姜继韶. 猪粪秸秆高温堆肥添加剂的选择及其保氮机理的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
 - [10] LI S, GU X, LI H, et al. Effects of phosphorus-containing additives on carbon transformation during pig manure composting[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32: 103290.
 - [11] 罗一鸣, 李国学, SCHUCHARDT F, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 235–242.
 - [12] 林小凤, 李国学, 任丽梅, 等. 氯化铁和过磷酸钙控制堆肥氮素损失的效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008(4): 1662–1666.
 - [13] 杨 岩, 孙钦平, 李 妮, 等. 不同过磷酸钙添加量对蔬菜废弃物堆肥的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(1): 66–72.
 - [14] 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(S2): 260–267.
 - [15] 魏彦红, 郁继华, 颜建明, 等. 不同添加剂对牛粪高温堆肥的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(3): 52–56; 61.
 - [16] 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, 2(6): 579–583.
 - [17] 李红霞, 蔡 禄, 季 祥, 等. 羊粪好氧堆肥最佳工艺参数的优化研究[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(6): 215–220.
 - [18] 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 533–540.
 - [19] LIU Y, WANG S, PAN J, et al. Antibiotics in urine of the general population: exposure, health risk assessment, and food factors[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2022, 57(1): 1–12.
 - [20] MAO H, ZHANG H, FU Q, et al. Effects of four additives in pig manure composting on greenhouse gas emission reduction and bacterial community change[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 292: 121896.
 - [21] LIU L, GUNDERSEN P, ZHANG T, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 31–38.
 - [22] 贡长生. 现代磷化工技术和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
 - [23] 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.
 - [24] 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.
 - [25] ZOU Y, HU Z, ZHANG J, et al. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics[J]. *Biore-source Technology*, 2016, 210: 81–87.
 - [26] 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.
 - [27] TORKASHVAND A M. Improvement of compost quality by addition of some amendments[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2010, 4(4): 252–257.
 - [28] CUI P, LIAO H, BAI Y, et al. Hyperthermophilic composting reduces nitrogen loss via inhibiting ammonifiers and enhancing nitrogenous humic substance formation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 98–106.
 - [29] 沈玉君, 陈同斌, 刘洪涛, 等. 堆肥过程中臭气的产生和释放过程研究进展[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(11): 104–108.