

添加磷尾矿对堆肥质量及 NH_3 、 H_2S 排放的影响

赖海玉, 吕同瑞, 张东莉, 张兰霞, 罗文海, 侯勇, 张伟, 钟顺和, 王春荣, 刘飞, 朱齐超

引用本文:

赖海玉, 吕同瑞, 张东莉, 等. 添加磷尾矿对堆肥质量及 NH_3 、 H_2S 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 415(1): 213-225.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0030>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Fe₂O₃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>

[工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 \$\text{NH}_3\$ 和 \$\text{H}_2\text{S}\$ 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>

[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>

[磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价](#)

赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2481-2488 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0558>

[不同镁/磷盐添加剂对蓝藻堆肥的氮素损失控制效果](#)

唐尚柱, 赵晓海, 斯鑫鑫, 王顺永, 李珊珊, 张学胜, 李玉成

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 428-435 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0940>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赖海玉, 吕同瑞, 张东莉, 等. 添加磷尾矿对堆肥质量及NH₃、H₂S排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 213-225.

LAI H Y, LÜ T R, ZHANG D L, et al. The impact of adding phosphate tailings on compost quality and NH₃ and H₂S emissions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 213-225.



开放科学 OSID

添加磷尾矿对堆肥质量及NH₃、H₂S排放的影响

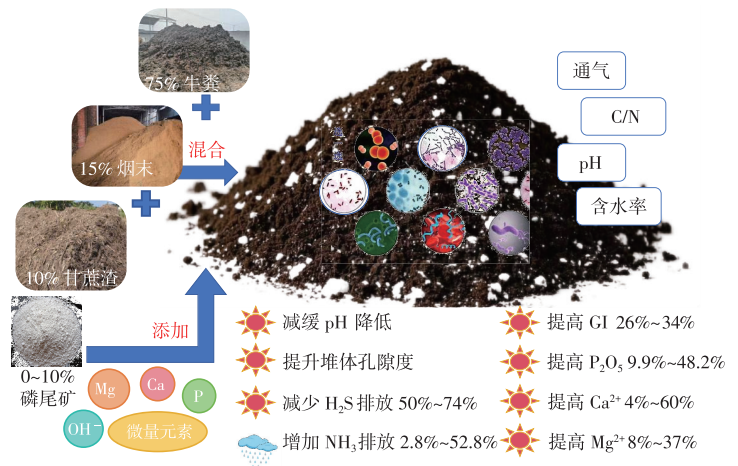
赖海玉^{1,3}, 吕同瑞^{1,3}, 张东莉^{1,3}, 张兰霞^{2,3}, 罗文海^{2,3}, 侯勇^{2,3}, 张伟¹, 钟顺和^{3,4}, 王春荣^{3,4}, 刘飞^{3,4}, 朱齐超^{2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 农业农村部西南有机循环工程中心重点实验室, 云南 大理 671200; 4. 云南顺丰洱海环保科技股份有限公司, 云南 大理 671000)

摘要:为优化好氧堆肥工艺, 加快腐熟效果并减少堆肥过程中的臭气排放, 本研究以牛粪、烟末和甘蔗渣混合原料为底物, 分别添加相对底物总干质量的2.5%、5%、7.5%和10%的磷尾矿作为处理组, 以不添加磷尾矿作为对照, 研究堆肥过程中堆体理化性质、养分含量变化及氨气(NH₃)、硫化氢(H₂S)等臭气排放特征。结果表明: 相较于对照处理, 添加磷尾矿可以降低堆体容重3%~10%, 减少H₂S排放50%~74%, 综合臭气强度降低2.8%~7.4%, 并且降低EC值1%~8%, 显著提高堆肥种子发芽指数(GI)26%~34%、五氧化二磷含量9.9%~48.2%、交换性钙4%~60%、交换性镁8%~37%, 但增加NH₃排放2.8%~52.8%。综合来看, 7.5%添加量效果最优, 降低H₂S排放74%, 臭气强度降低5.3%, 提升GI值32%, 铵态氮(NH₄⁺-N)与重金属含量均满足有机肥生产标准。研究表明, 适量添加磷尾矿可以有效改善堆体结构, 减少H₂S排放并降低臭气强度, 有助于提高堆肥效率和质量, 实现工农业固废磷尾矿和牛粪的无害化和资源化利用。

关键词:磷尾矿; 好氧堆肥; 臭气排放; 堆肥质量

中图分类号: X512; X705; S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2026)01-0213-13 doi:10.11654/jaes.2025-0030



The impact of adding phosphate tailings on compost quality and NH₃ and H₂S emissions

LAI Haiyu^{1,3}, LÜ Tongrui^{1,3}, ZHANG Dongli^{1,3}, ZHANG Lanxia^{2,3}, LUO Wenhai^{2,3}, HOU Yong^{2,3}, ZHANG Wei¹, ZHONG Shunhe^{3,4}, WANG Chunrong^{3,4}, LIU Fei^{3,4}, ZHU Qichao^{2*}

(1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Key Laboratory of Southwest Organic Cycle Engineering Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671200, China; 4. Yunnan Shunfeng Erhai Environmental Protection Technology, Dali 671000, China)

Abstract: In order to optimize the aerobic composting process, accelerate the composting effect, and reduce odor emissions during the composting process, This study used a mixture of cow manure, tobacco dust, and sugarcane bagasse as substrates, and added 2.5%, 5%,

收稿日期: 2025-01-09 录用日期: 2025-04-27

作者简介: 赖海玉(2000—), 女, 广东梅州人, 硕士研究生, 研究方向为固体废弃物资源化利用。E-mail: quena_lhy@163.com

*通信作者: 朱齐超 E-mail: qichaozhu@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900601)

Project supported: National Key Research and Development Program of China(2022YFD1900601)

7.5%, and 10% of the total dry weight of the substrate to phosphorus tailings as treatment groups, respectively. No phosphorus tailings were added as a control. The physical and chemical properties, nutrient content changes, and odor emission characteristics such as ammonia (NH_3) and hydrogen sulfide (H_2S) during the composting process were studied. The results showed that compared with the control treatment, the addition of phosphate tailings could reduce the bulk density of the compost by 3%–10%, reduce H_2S emissions by 50%–74%, decrease the comprehensive odor intensity by 2.8%–74%, and reduce EC values by 1%–8%. It significantly improved the germination index (GI) of compost seeds by 26%–34%, exchangeable calcium by 4%–60%, exchangeable magnesium by 8%–37%, but increased NH_3 emissions by 2.8%–52.8%. Overall, the 7.5% addition has the best effect, reducing H_2S emissions by 74%, decreasing odor intensity by 5.3%, increasing GI value by 32%, and meeting the organic fertilizer production standards for ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) and heavy metal content. Research has shown that the appropriate addition of phosphate tailings can effectively improve the structure of the heap, reduce H_2S emissions, and decrease odor intensity, which helps to improve composting efficiency and quality, and achieve the harmless and resource utilization of industrial and agricultural solid waste phosphate tailings and cow manure.

Keywords: phosphate tailings; aerobic composting; odor emissions; composting quality

农业废弃物包括畜禽粪便、作物剩余物和废渣等,产量大且成分复杂^[1]。据统计,2021年我国畜禽粪便总排放量约39亿t,其中牛粪约14亿t^[2],甘蔗渣约2 200万t^[3]。另外,我国卷烟加工每年产生烟末等废弃物约100万t^[4]。农业废弃物中残留的有害物质,包括重金属、抗生素、病原菌、盐分等,会通过多种途径输入到土壤、地表水和大气中,从而造成区域环境污染,威胁人类健康^[5]。

与此同时,农业废弃物富含有机质及多种营养成分,其资源化利用是农业绿色转型的重要任务之一^[1]。好氧堆肥是农业废弃物资源化利用的主要方法。然而在不稳定有机物转化为稳定腐殖质物质过程中,随着代谢产物转化,堆肥过程会排放氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)及温室气体等,造成空气污染及养分损失。添加外源腐熟促进剂被认为是解决该问题的有效途径。常见的外源腐熟促进剂可分为物理、化学和微生物三类^[6]。物理添加剂包括生物炭、膨润土、麦饭石、沸石等,一方面可通过丰富的孔隙结构提高堆体 O_2 含量和持水性,减少厌氧区域,进而减少污染气体的产生,另一方面其富含负电荷吸附位点,可增加对污染气体的吸附能力^[7],减少污染气体排放。化学添加剂如过磷酸钙、钙镁磷肥等,可通过缓冲堆体酸碱度,减少 NH_3 排放^[8]。而添加微生物菌剂,如VT菌剂、Rw酵素剂等,可以加速升温,延长高温期,减少养分损失,降低温室气体和恶臭氮硫化合物的排放^[9-10]。然而受资源量、价格、效果等因素限制,寻求一种高效、廉价的外源腐熟促进剂仍然是堆肥领域的热点和难点问题。

废弃物资源化利用是可持续发展的关键路径。在磷化工产业中,磷矿浮选的废弃物(磷尾矿)年产量约700万t,堆存量约为12亿t,但综合利用率却不足

20%^[11]。磷尾矿堆存占用大量土地的同时,对环境存在巨大的潜在威胁^[12],其资源化利用已成为磷肥产业发展的关键限制因素。磷尾矿主要由钙、镁的碳酸盐等矿物组成,白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 是其主要的矿物成分,其次是氟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$,此外含有少量的石英和方解石^[13],具备巨大的农用潜力^[14]。然而,目前关于磷尾矿的研究较少,已有研究多集中于尾矿的再浮选利用、开发土壤调理剂等领域^[15-16]。近期也有学者关注在堆肥中添加磷尾矿的效果,但更多关注重金属钝化及磷活化方向。如有研究者^[17]认为污泥堆肥添加磷尾矿,促进了重金属向稳定形态转化,降低了其在矿山修复中的重金属释放风险。有研究者^[18]将磷尾矿与水稻秸秆、酱油渣等进行堆肥,通过发酵促进磷向有效态转化,磷转化率高达78.7%。然而,在堆肥中添加磷尾矿对堆肥质量及气体排放的影响仍鲜有研究。

综上所述,本研究设置不同磷尾矿添加量,研究其对牛粪、烟末、甘蔗渣堆肥过程、 NH_3 、 H_2S 臭气排放及堆肥质量的影响,以期为畜禽粪便好氧堆肥的添加剂选择提供现实依据与理论基础,实现工农结合,以废治废。

1 材料与方法

1.1 试验材料

牛粪来源于洱海流域牛粪收集站,烟末为熟烟末梗,甘蔗渣为甘蔗榨糖之后的固体残渣。磷尾矿来自云南磷化集团的反浮选磷尾矿,所用原料特性如表1所示。

1.2 堆肥方式和取样

参考前人^[19]的研究,本试验采用定制160 L的法兰桶发酵罐来模拟好氧堆肥,发酵罐结构如图1所示。罐体用定制的曝气筛网隔开为上下两部分,上部

表1 堆肥材料的关键理化性质(平均值±标准偏差)

Table 1 Key physiochemical properties of composting materials(mean value±standard deviation)

参数Parameter	牛粪Cow manure	烟末Tobacco residue	甘蔗渣Sugarcane bagasse	磷尾矿Phosphorus tailing
含水量Water content/% ^a	77.69±1.53	12.86±0.42	39.14±0.83	—
pH ^a	7.93±0.12	5.17±0.08	7.09±0.06	7.40±0.04
电导率EC/(mS·cm ⁻¹) ^a	1.83±0.01	9.90±0.02	0.29±0.03	3.48±0.02
总氮TN/% ^b	1.96±0.01	1.64±0.01	0.28±<0.01	—
五氧化二磷P ₂ O ₅ / % ^b	1.52±0.07	0.74±0.02	0.13±0.01	9.16±0.04
氧化钾K ₂ O/% ^b	1.3±0.05	3.47±0.02	0.13±0.01	—
有机质Organic matter/% ^b	40.46±1.31	76.18±1.92	92.40±4.29	—
总碳Total carbon/% ^b	23.47±0.76	44.19±1.11	53.6±2.49	—
碳氮比C/N ^b	11.97	26.94	191.42	—
交换性钙Exchangeable calcium/(g·kg ⁻¹) ^b	6.64±0.09	12.40±0.06	0.93±0.03	9.03±0.19
交换性镁Exchangeable magnesium(g·kg ⁻¹) ^b	2.59±0.01	4.27±0.08	0.15±<0.01	0.88±0.05
总砷Total As/(mg·kg ⁻¹) ^b	—	1.66±0.62	—	1.41
总汞Total Hg/(mg·kg ⁻¹) ^b	—	0.01±0.01	—	0.12
总铅Total Pb/(mg·kg ⁻¹) ^b	—	3.33±0.67	—	27.64
总镉Total Cd/(mg·kg ⁻¹) ^b	—	1.07±0.34	—	0.34
总铬Total Cr/(mg·kg ⁻¹) ^b	—	12.55±2.13	—	20.11
粒径Size	—	—	—	95%≤200目

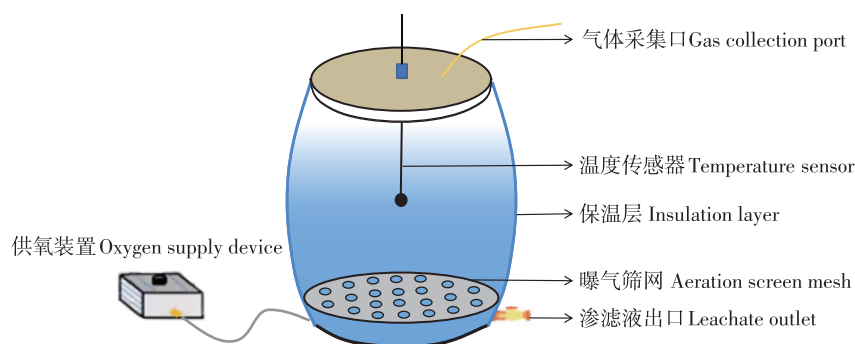
注:^a鲜质量;^b干质量。Note: ^afresh weight; ^bdry weight.

图1 模拟堆肥系统的结构图

Figure 1 Schematic diagram of the composting simulation system structure

为堆体,用于发酵试验,下部为曝气层,用于连接供氧装置和收集渗滤液。在桶盖上留有两孔,分别用于采集气体和测量温度。堆肥原料为75%牛粪、15%烟末、10%甘蔗渣(鲜质量),混合材料的初始含水率约为65%,C/N约为25,密度为0.5 kg·L⁻¹。试验按照磷尾矿添加量(干质量),共设置0%、2.5%、5%、7.5%、10% 5个处理,分别表示为T1、T2、T2、T4、T5。堆肥时间为35 d。堆肥期间持续通风,通风速率为升温期、高温期0.3 L·kg⁻¹·min⁻¹(干物质),降温期0.2 L·kg⁻¹·min⁻¹(干物质)^[20]。每天测量3次温度并取平均值,同时记录室温。在第1、3、5、7、14、21、28、35天翻堆并采集混合均匀的堆肥样品。样品分为鲜样和风

干样,鲜样在4℃下保存,以检测酸碱度(pH)、电导率(EC)、含水率、种子发芽指数(GI)、铵态氮(NH₄⁺-N),风干样过0.1 mm筛子后备用分析,以检测有机质、总养分、交换性钙、交换性镁、重金属含量。气体样品每天用1-LTedlar®PLV气体取样袋采集。

1.3 分析方法

堆体温度使用温度传感器记录。堆肥基础指标,包括pH、EC、含水率、有机质、GI、总养分等参照《有机肥料》(NY 525—2021)^[21]标准检测,NH₄⁺-N经KCl(2 mol·L⁻¹)浸提稀释后采用流动分析仪(Auto Analyzer 3, Seal, 德国)测定。容重为物料质量与体积(堆高×桶底面积)之比。交换性钙、交换性镁用改良NY/

T 1121.13—2006 方法检测^[22]。NH₃用硼酸吸收法测定, H₂S、O₂、CO₂采用便携式沼气分析仪(BM13345, BiogasCheck, 英国, Geotech)测定。重金属采用NY/T 1978—2010方法进行前处理^[23], 用电感耦合等离子体发射光谱法检测。综合臭气强度(OI)通过韦伯·费希纳(Weber-Fechner)定律表示^[24]:

$$OI = \sum (k_i \lg C_{od,i} + b_i)$$

式中: k_i 为韦伯·费希纳系数, 其中NH₃为1.13; H₂S为1.462; b 为截距常数, NH₃为1.681; H₂S为3.659; i 为特定恶臭物质, C_{od} 为臭气浓度, mg·m⁻³。

1.4 数据处理

通过 Microsoft Excel 2020 软件整理数据, 利用 SPSS 26.0 进行统计分析, 用单因素方差分析确定差异显著性 ($P < 0.05$), 用 Origin 2020 作图。

2 结果与讨论

2.1 磷尾矿添加对堆肥进程的影响

温度变化是堆肥进程和微生物活性的重要体现^[25]。各处理的堆体温度变化如图 2a 所示, 受腐熟程度和翻堆影响, 各处理堆体温度变化趋势一致, 整体呈波动下降趋势。堆肥前期低分子量物质(如脂类、蛋白质和一些糖)迅速降解^[26], 所有处理快速升温, 于第 1 天达到了 60 °C 以上。T5 处理于第 2 天达到温度峰值, 其余处理在试验第 8 天左右达到温度峰值, 各处理温度峰值相当。此后, 随可生物降解的有机物质消耗, 堆体温度逐渐下降, 最终与环境温度相近。统计分析表明, 磷尾矿添加量对温度的影响不显著 ($P > 0.05$), 所有处理堆体温度超过 50 °C 的时间均在 7 d 以上, 符合我国《有机肥料》(NY 525—2021)质量标准^[27]。

各处理 O₂ 含量演变规律与温度变化类似(图 2b), 即先降低后升高, 最后逐渐稳定。O₂ 含量处于 10%~21% 之间, 为好氧堆肥微生物生长繁殖代谢较为合适的条件^[28]。部分时期(如堆肥第 2 天), 堆体微生物快速分解小分子物质, 消耗大量 O₂, 加之堆肥原料中牛粪、烟末粒径细, 造成堆体结构致密, 局部厌氧严重^[29]。翻堆后堆体与 O₂ 进一步混合, 微生物代谢活性增强, 耗氧量明显增加, 堆体 O₂ 含量进入快速下降阶段^[30-31]。整个堆肥期间, 各处理间 O₂ 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。

容重是畜禽粪便堆肥过程中一项重要的物理性质, 间接反映堆肥过程堆料的孔隙度, 堆肥物料的压实程度及 O₂、水分穿过堆料的难易程度, 对堆肥的进程尤为重要^[32]。如图 2c 所示, 不同处理的容重变化情

况一致, 均呈先升高后降低趋势。磷尾矿添加能够显著改善堆体容重 ($P < 0.05$), 其中 T4、T3、T2 处理与 T1 达到极显著差异 ($P < 0.01$), 较对照处理降低 3%~10%。堆体容重减小, 可增加堆料孔隙, 增强透气性, 利于堆体 O₂ 与水热扩散, 从而提升堆肥效率与产品质量^[33]。

2.2 磷尾矿添加对堆肥臭气排放的影响

有机物在高温厌氧条件下分解会产生 H₂S 臭气。如图 3a 与图 3b 所示, 各处理 H₂S 排放集中在高温期(温度 > 50 °C), 排放峰值出现在堆肥第 2 天或第 8 天, 此后逐渐降低至检出限以下, 与前人研究一致^[34]。在堆肥前期, 各处理 H₂S 排放速率快速增加。0~7 d, T1

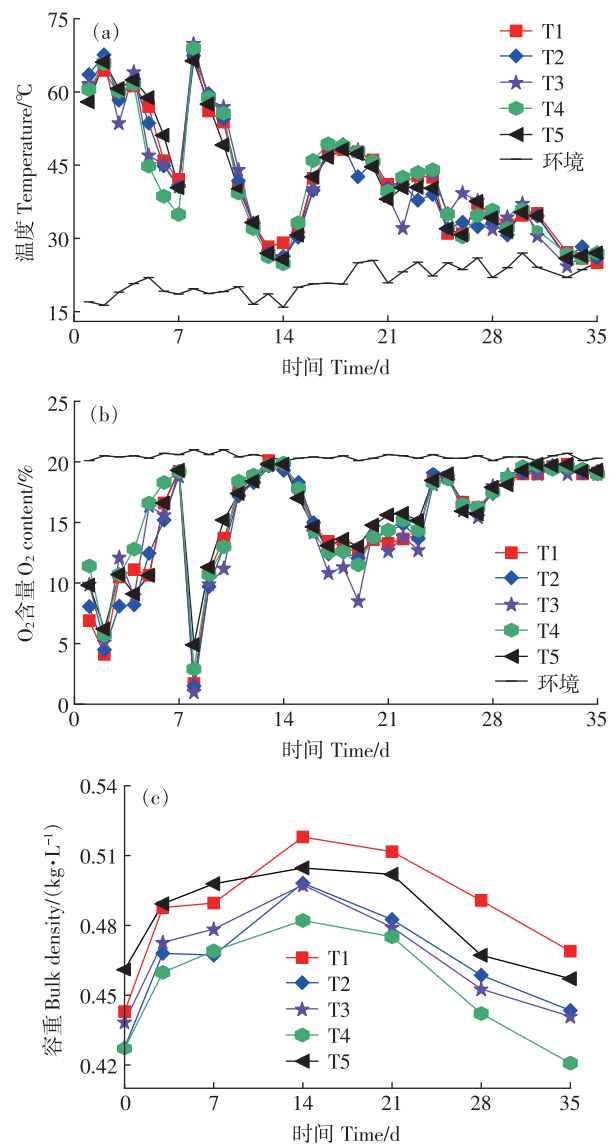
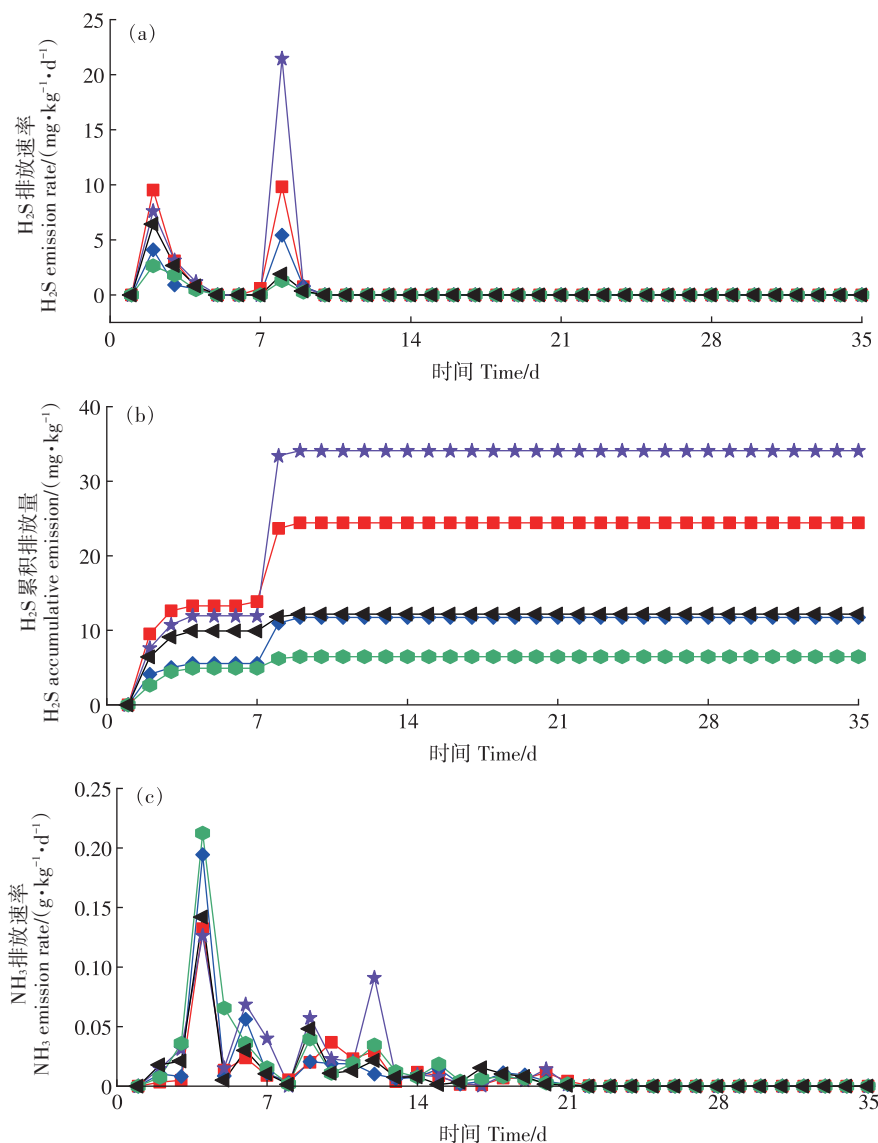


图2 堆肥过程中堆体温度、O₂含量、容重的变化
Figure 2 Changes of temperature, O₂ content and bulk density during the composting process

处理H₂S排放速率上升最快,显著高于其他处理($P < 0.05$)。第7天翻堆以后,微生物活性增强^[35]导致O₂含量急剧下降,各处理H₂S排放速率再次急剧升高。随后,随温度和水分含量降低,局部O₂含量增加,抑制H₂S产生。在第10天后,各处理排放率降至0。与T1处理相比,T2、T4、T5处理H₂S累积排放量分别减少52%、74%、50%,T3处理却增加39%,可能是T3处理第8天温度高达70℃,O₂含量仅为1%,呈极厌氧水平,H₂S排放量明显增加,导致总排放量增加^[36]。总体而言,适量添加磷尾矿能减少H₂S的排放,T4处理效果最佳($P < 0.01$)。这是因为添加磷尾矿后,堆体容重和含水率降低,提升了堆体孔隙度,利于O₂进入,抑制厌氧微生物活性,从源头减少了H₂S气体的产生。同时磷尾矿主要为碳酸盐矿物,呈弱碱性,能够中和堆肥过程中产生的乳酸等有机酸成分,减少游离氢离

子供给,进而抑制S²⁻与氢离子的结合,减少H₂S气体形成^[37-38]。有研究者^[39]发现加入过磷酸钙可减少H₂S排放量65.5%,钙离子的添加可能促进CaS形成,从而减少H₂S的排放,但仍需进一步实证研究。

NH₃不仅是堆肥过程中的主要臭气之一,还是堆肥过程中氮素流失的重要途径^[40]。不同堆肥处理下NH₃排放量的变化如图3c和图3d所示。NH₃排放主要集中在堆肥前14d,占总NH₃排放量的90%以上。这是因为高温条件下矿化作用将有机氮转化为无机氮,形成了大量的NH₄⁺-N。随着温度和pH的升高,NH₄⁺-N逐渐转化为NH₃挥发^[41]。在第4天,各处理的最高排放率为0.13~0.21 g·kg⁻¹·d⁻¹。T1、T2、T3、T4、T5处理下NH₃累积排放量分别为0.36、0.42、0.55、0.55、0.37 g·kg⁻¹。与T1处理相比,添加磷尾矿处理增加NH₃累积排放量2.8%~52.8%。这可能是由于磷尾



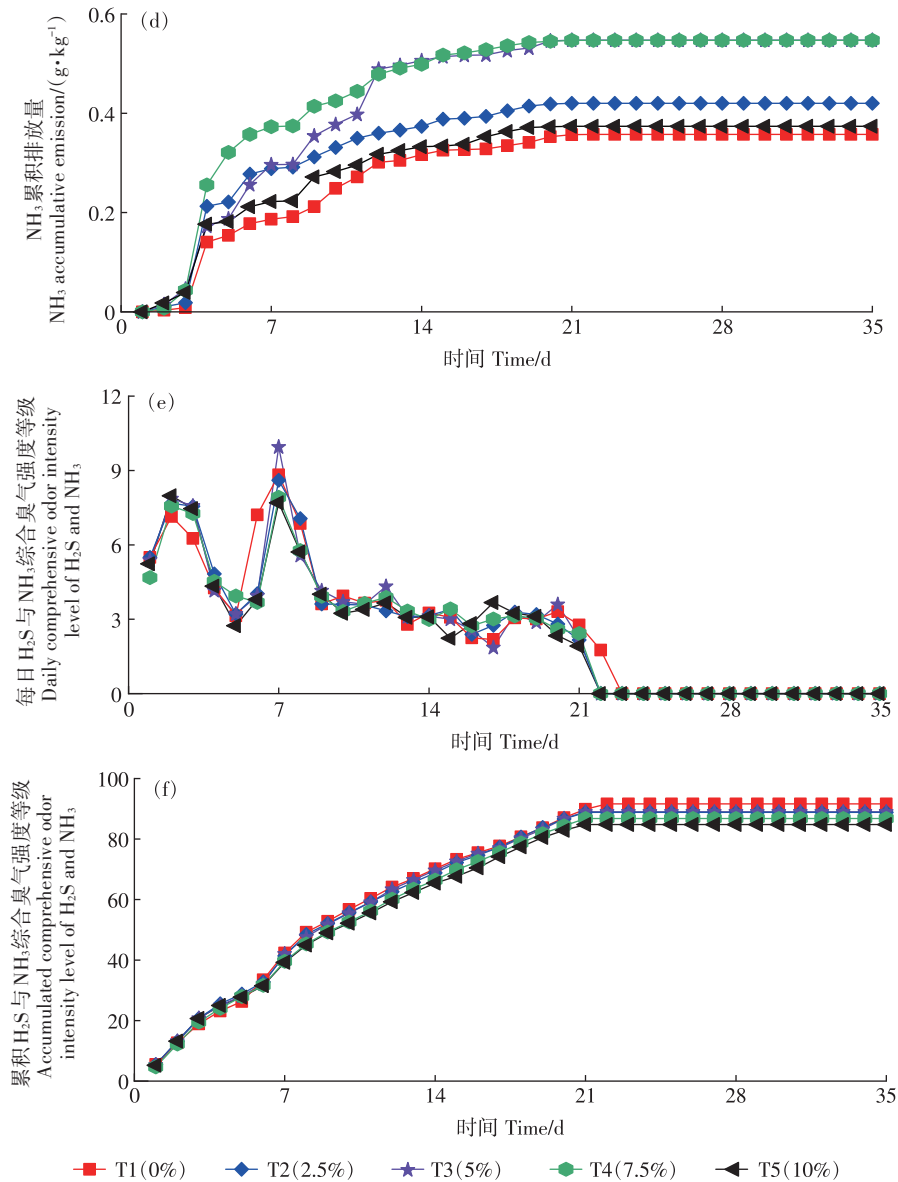


图3 堆肥过程中H₂S、NH₃排放速率和累积排放量及综合臭气强度

Figure 3 Daily and cumulative emissions of H₂S, NH₃ and comprehensive odor intensity levels during composting process

矿中碳酸钙镁的添加提高了前期的堆体碱度,促进了NH₃挥发^[42]。这与前人^[43]添加钙镁磷肥增加了NH₃排放量的结果一致。

从臭气强度(图3e、图3f)来看,T1、T2、T3、T4、T5前22 d的累积综合臭气强度分别为91.61、88.82、89.01、86.78、84.79,其中T4和T5处理与对照达到极显著差异,分别较T1处理降低5.3%和7.4%。臭气强度>5的天数分别为6、5、5、4、5 d。与T1相比,T2、T3、T4、T5综合臭气强度降低2.8%~7.4%,即添加磷尾矿能够降低堆肥的综合臭气强度,减少恶劣臭气强度天数。

2.3 磷尾矿添加对堆肥养分含量的影响

由于堆肥过程中不稳定有机质的降解,堆体质量

减轻^[44],TN、P₂O₅、K₂O等养分浓缩富集,浓度显著上升。如表2所示,堆肥结束时(第35天),相较于T1,添加磷尾矿处理的TN和K₂O含量降低1.4%~10.9%,P₂O₅的含量显著提高9.9%~48.2%,其中,T4处理P₂O₅含量提升39.8%。这一方面是磷尾矿不含TN、K₂O,有机物料的添加比例减少导致初始养分含量下降;另一方面是添加磷尾矿增加了NH₃挥发损失,致使堆体TN含量下降^[45]。但所有处理均符合堆肥产品标准(总养分≥4%)^[21]。

堆肥结束后(第35天)各处理交换性钙含量较初始均有提升(图4a),T1、T2、T3、T4、T5分别显著提升17.4%、21.2%、32.2%、77.8%、56.4%,其中T4、T5与T1

处理差异达极显著。堆肥结束时,T1、T2、T5交换性镁含量较初始显著降低,T3、T4分别较初始显著提升9.1%和20.6% ($P<0.05$,图4b)。相比于T1,添加磷尾矿增加堆体交换性钙4%~60%,交换性镁8%~37%。可能是由于堆肥过程中产生的有机酸促进了磷尾矿中磷酸钙、氟磷灰石等矿物的活化分解^[12,46-47],但堆肥过程中渗滤液排放导致了部分钙镁流失^[48]。

各处理有机质含量变化呈相似趋势(图4c)。由于微生物的矿化作用^[49],有机质含量随时间下降。添

加磷尾矿对堆肥腐熟后的有机质含量影响显著,除T2处理外,T3、T4、T5与T1处理的差异达到显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)。这归因于磷尾矿中不含有有机质,添加磷尾矿降低了堆体有机质占比。经检测,各处理有机质含量均达到国家有机肥标准^[36]。另外,试验结果表明添加磷尾矿后堆体紧实度下降(图2c),微生物活性增强,可能加速了有机质分解进程。

2.4 磷尾矿添加对堆肥质量安全的影响

各处理pH总体呈上升趋势(图5a)。在堆肥前

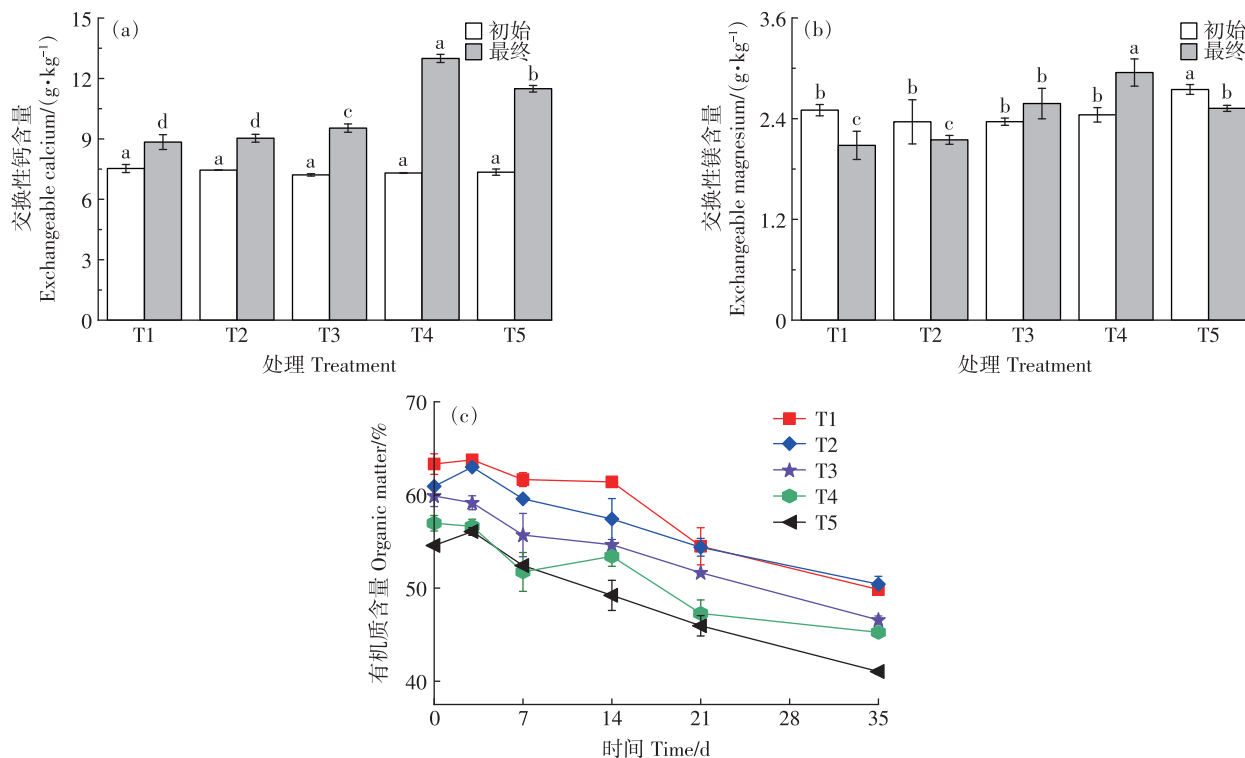
表2 初始和最终堆肥物料养分含量

Table 2 Nutrient content of the compost materials at the initial and final period

养分含量 Nutrient content	时期 Period	T1	T2	T3	T4	T5
总氮 TN/(g·kg ⁻¹)	初始	16.26±0.12a	16.35±0.51a	15.42±0.09a	15.17±0.14a	12.89±0.43b
	最终	27.78±1.40a	25.77±0.87b	25.48±0.43b	25.08±0.58c	24.75±0.12c
五氧化二磷 P ₂ O ₅ /(g·kg ⁻¹)	初始	8.75±0.81d	10.03±0.23c	10.98±0.02c	12.98±0.14b	14.74±0.03a
	最终	13.28±0.11e	14.59±0.12d	15.86±0.08c	18.56±0.42b	19.68±0.17a
氧化钾 K ₂ O/(g·kg ⁻¹)	初始	21.30±0.13a	21.71±0.41a	21.10±0.12a	20.49±0.21a	21.01±0.04a
	最终	38.63±0.09a	38.10±0.52ab	37.54±0.71bc	36.25±0.52c	35.47±0.81c
总养分 Total nutrient/%	初始	4.63±0.23c	4.81±0.82ab	4.75±0.19b	4.86±0.13a	4.86±0.21a
	最终	7.97±0.21ab	7.85±0.13b	7.89±0.76ab	7.99±0.12a	7.99±0.73a

注:同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters within the same line indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

图4 堆肥前后交换性钙、交换性镁及有机质含量的变化

Figure 4 Changes of exchangeable calcium, exchangeable magnesium, and organic matter content during the composting process

期,随着微生物降解有机物质和释放 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,堆体pH快速升高^[50],第8天后稳定在8.5以上,这与国内研究者^[51]在猪粪堆肥中添加磷添加剂以及国外研究者^[52]在牛粪堆肥中添加30%磷浮选废渣等相关研究结果一致,最终堆体pH稳定在9.0~9.5。T4处理对pH的提升效果显著($P<0.05$)。

EC值反映堆体盐度,对种子萌发和植物生长具有重要影响^[53-54]。由图5b可知,各处理EC值先快速下降后缓慢上升。堆肥初期,由于腐殖化过程中小分子挥发、离子间的沉淀反应和络合反应^[55],致使EC值急剧下降。随着堆肥进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以气体的形式挥发,有机酸降解,各处理EC值降低,并在第3~7天降至最低^[55]。随后,有机物的降解使堆体含盐量逐渐增加,最终趋于稳定^[56-57]。经过35d堆肥,各处理的EC值均未超过 $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (植物安全生长的盐度极限),相较于T1,添加磷尾矿可降低堆体EC值1%~8%,其中T2处理显著降低了堆体的EC值。

各处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量先升后降(图5c),在堆肥前期,随着氨基酸、蛋白质等易降解含氮有机物降解,堆料中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积^[58]。第3~14天,堆体温度继续升高,抑制了硝化细菌活性,氮素主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态存

在,各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在堆肥第14天达到峰值。14~28d,随着温度下降,硝化菌活性逐渐增强^[59], $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进一步转化为 NH_3 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[60],各堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量快速下降,添加磷尾矿处理下降速度更快。按照腐熟标准 $\text{NH}_4^+\text{-N}<400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[34],堆肥结束时,T4、T5处理堆体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 $222.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $356.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,符合有机肥产品标准^[21]。

GI是衡量堆肥腐熟度与安全性的一个重要指标。当 $\text{GI}>80\%$ 时认为达到腐熟标准^[58]。由图5d可知,35d堆肥过程中,各处理GI先后降再升。堆肥第21天时GI值 $\text{T4}>\text{T5}>\text{T3}>\text{T2}>\text{T1}$,分别为142%、135%、135%、119%、107%,均达完全腐熟。堆肥结束后,磷尾矿添加组GI较T1提升26%~34%,其中T3处理提升幅度最大,T4处理较T1提高32%。这可能是由于磷尾矿添加降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和有机酸含量^[61]。其中T4较T1极显著提高了堆肥的GI值($P<0.01$)。表明添加磷尾矿能够提升堆肥腐熟度,加快堆肥的无害化。

参考《有机肥料》(NY 525—2021)重金属限量指标^[21],堆肥前,所有处理重金属含量差异不大,堆肥后期T1、T2、T3处理Cd超过限量标准,而T4、T5处理低于限量标准(表3)。这可能是由于堆肥过程中有机

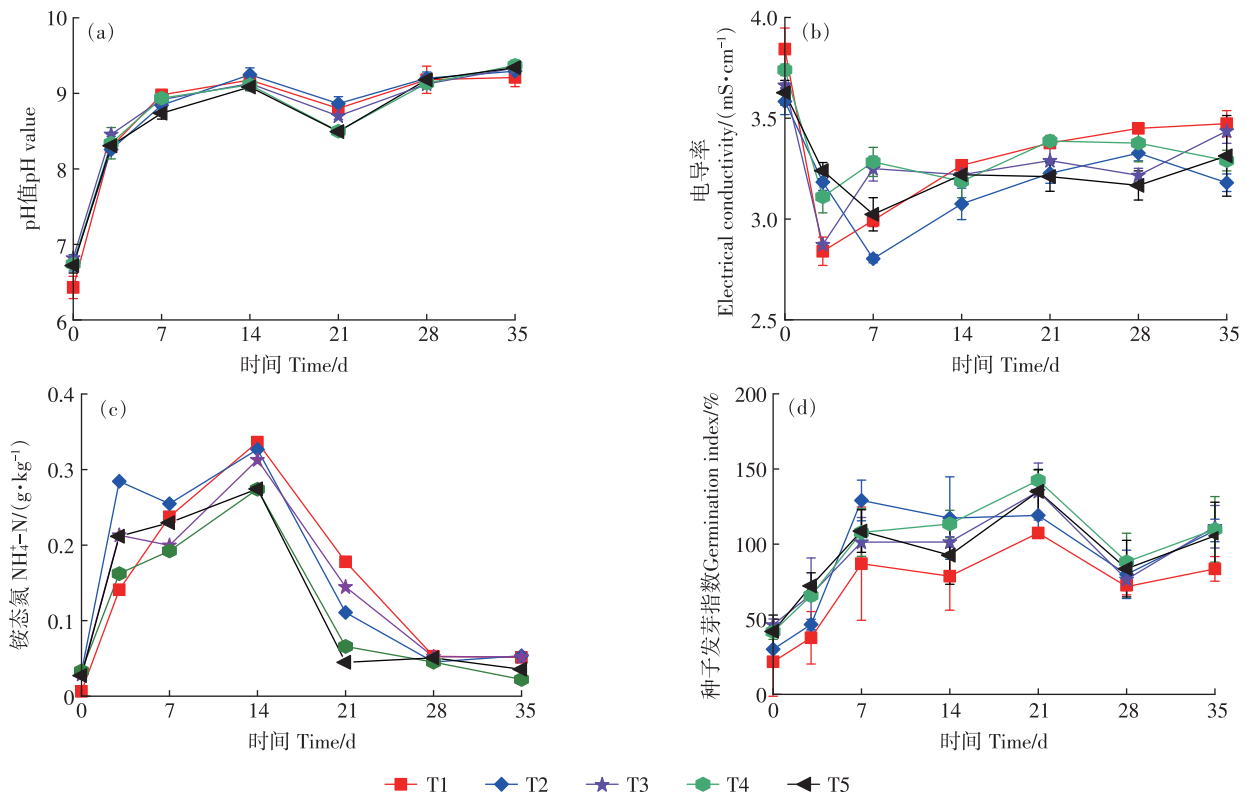


图5 不同处理堆体pH、电导率、铵态氮和种子发芽指数的变化

Figure 5 Changes of pH value, electrical conductivity, ammonium nitrogen, germination index during composting process

表3 初始和最终堆肥重金属含量(mg·kg⁻¹)Table 3 Heavy metal contents of the initial and the final compost materials(mg·kg⁻¹)

元素 Element	时期 Period	T1	T2	T3	T4	T5
总砷 Total As	初始	1.66±0.61a	1.53±0.52a	1.48±0.68a	1.25±0.73a	1.12±0.41a
	最终	2.78±1.02a	2.14±0.92b	2.86±0.41a	2.39±0.58ab	2.30±0.68ab
总汞 Total Hg	初始	0.01±0.01a	0.01±0.01a	0.01±0.01a	0.01±0.01a	0.01±0.01a
	最终	0.02±0.01a	0.01±0.01a	0.01±0.01a	0.02±0.01a	0.01±0.01a
总铅 Total Pb	初始	3.33±0.71a	3.70±0.42a	2.69±0.62b	3.58±0.75a	2.24±0.48b
	最终	10.80±2.12a	9.37±1.76ab	7.26±1.73b	7.98±1.91b	10.87±2.52a
总镉 Total Cd	初始	1.07±0.31a	1.29±0.47a	1.30±0.42a	1.05±0.28a	1.09±0.41a
	最终	5.14±0.77a	4.33±0.12b	3.17±0.48c	2.91±0.41d	2.22±0.22d
总铬 Total Cr	初始	12.55±2.12b	13.37±2.35b	13.48±2.05b	18.13±3.17a	12.85±3.04b
	最终	25.22±2.08a	21.65±2.45b	21.61±2.69b	23.15±2.52ab	23.12±2.75ab

物分解、CO₂排放等导致堆肥总质量减少,重金属含量升高^[58,62]。另外,可能是电感耦合等离子体发射光谱法检测的误差导致的^[63-64],堆肥中腐植酸、木质素等大分子有机物及硫化物与Cd形成的络合物,可能导致等离子体不稳定,影响了Cd测定值的稳定性^[65-67]。但从堆肥末期各处理Cd含量随磷尾矿添加量增加显著降低可以判断,在堆肥中添加磷尾矿物料不会增加重金属Cd的污染风险。

堆肥过程中堆体理化性质是影响臭气排放、堆肥质量的重要因素。本研究对堆体理化性质(O₂含量、pH、容重、C/N、NH₄⁺-N)、堆肥质量(GI、有机质、EC、TN、AP、AK、交换性钙、交换性镁)与臭气排放(NH₃和H₂S)开展相关性分析。结果(图6)表明,GI与堆肥时间、O₂含量、pH、容重呈显著正相关($P<0.05$),有机质含量与H₂S排放量呈显著正相关,与堆肥时间、pH、O₂含量呈显著负相关,表明堆体O₂含量和pH是影响有机质分解的关键因素,而有机质分解促进了H₂S的排放。EC值与堆体温度、NH₄⁺-N含量分别呈极显著和显著负相关,这与前人研究结果一致^[68]。堆体交换性钙和交换性镁含量均与堆体温度和NH₄⁺-N含量呈显著负相关。此外,相关性分析显示,NH₃累积排放量与EC值呈极显著负相关($P<0.01$),与NH₄⁺-N含量呈极显著正相关($P<0.01$),而H₂S累积排放量与温度呈极显著正相关($P<0.01$),与EC值呈极显著负相关($P<0.01$)。这表明,磷尾矿添加可能通过改善堆体的孔隙度和O₂含量,抑制厌氧过程,进而减少H₂S的排放^[69],同时利于有机物的腐殖化,促进了氮的矿化,使堆体NH₄⁺-N含量升高,进而增加了NH₃排放。协同实现NH₃与H₂S的减排,提高堆肥过程中氮的留存率,可能是未来外源腐熟促进剂研究中需要突破的重点。

3 结论

(1)适当添加磷尾矿对堆体温度和O₂含量影响不显著,但显著降低了堆体容重,改善了堆体结构。添加磷尾矿可降低堆肥H₂S排放,但增加了NH₃排放,NH₃与H₂S的协同减排仍待突破。

(2)适当添加磷尾矿可增加堆肥P₂O₅、交换性钙、交换性镁含量,同时可显著降低堆体EC值,显著提高GI值,促进堆体腐熟。

(3)添加7.5%磷尾矿的效果最优,相比于不添加磷尾矿可降低H₂S排放74%,综合臭气强度降低5.3%,P₂O₅含量提升39.8%,GI提升32%,交换性钙、交换性镁分别较堆肥初始提升77.8%和20.6%,各项指标均满足有机肥产品标准。

参考文献:

- [1] 姚凯. 农业废弃物资源化利用的发展现状、问题及对策分析[J]. 新农村, 2024(34): 25-27. YAO K. Current situation, problems and countermeasures of resource utilization of agricultural waste[J]. *New Farmers*, 2024(34): 25-27.
- [2] 安婧, 丁子明, 高程程, 等. 畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4764-4774. AN J, DING Z M, GAO C C, et al. Analysis of the environmental risk of livestock manure pollution and resource treatment technology[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4764-4774.
- [3] 宋雪萍, 龙建磊, 赵思宇, 等. 甘蔗渣资源利用现状与高值化利用途径[J]. 中国造纸, 2023, 42(8): 61-68. SONG X P, LONG J L, ZHAO S Y, et al. Current situation and high-value utilization path of bagasse resources[J]. *China Pulp & Paper*, 2023, 42(8): 61-68.
- [4] 李玉辉, 苏海建, 王艳, 等. 响应面法优化分子蒸馏纯化废次烟末中香味成分的研究[J]. 农产品加工, 2018(14): 45-48. LI Y H, SU H J, WANG Y, et al. Study on molecular distillation of aroma compounds

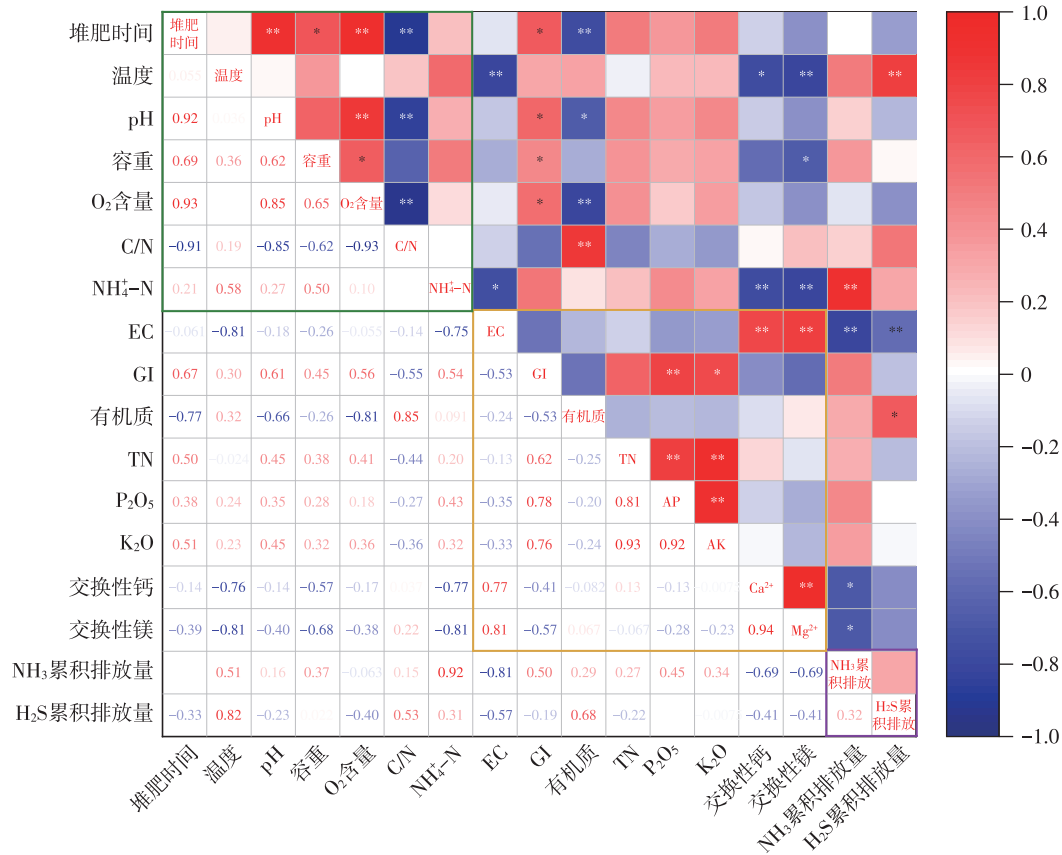


图6 堆体理化特征与堆肥质量、臭气排放的相关分析

Figure 6 Correlation coefficients among key indicators during composting process and manure quality, and odor gas emission

from waste tobacco by response surface methodology[J]. *Farm Products Processing*, 2018(14):45-48.

[5] 李帆, 徐世永, 邓凯东. 畜禽粪污管理及资源化利用现状与展望[J]. 现代畜牧科技, 2023(10):102-105. LI F, XU S Y, DENG K D. Current situation and prospect of livestock manure management and resource utilization[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2023(10):102-105.

[6] 邓隆华. 好氧堆肥恶臭气体排放特征及其生物法去除应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022. DENG L H. Odor emission characteristics of the off-gas from livestock manure aerobic composting tank and its bioreactor deodorization[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.

[7] HE X Q, YIN H J, HAN L J, et al. Effects of biochar size and type on gaseous emissions during pig manure/wheat straw aerobic composting: insights into multivariate-microscale characterization and microbial mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271:375-382.

[8] 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. Process optimization of pollutant gases emission reduction with superphosphate addition during pig manure composting [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5):304-312.

[9] MAO H, LV Z Y, SUN H D, et al. Improvement of biochar and

bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258:195-202.

[10] 杨佳, 王国英, 唐若兰, 等. 生物炭和菌剂对羊粪好氧堆肥腐熟度和温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10):224-231. YANG J, WANG G Y, TANG R L, et al. Effects of biochar and microbial inoculum on maturity and greenhouse gas emissions during microaerobic composting of sheep manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(10):224-231.

[11] 张锐. 基于磷尾矿和沼渣综合利用的生物有机肥制备及应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. ZHANG R. Preparation and application of bio-organic fertilizer based on the comprehensive utilization of phosphorus tailings and digestate[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[12] 张守逊, 吴雨瑶, 郭永杰, 等. 磷尾矿综合利用研究现状[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(7):27-36. ZHANG S X, WU Y Y, GUO Y J, et al. Research status on comprehensive utilization of phosphorus tailings[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(7):27-36.

[13] 吴东国, 于雪. 尾矿再利用的试验研究[J]. 有色矿冶, 2007, 23(3):26-29. WU D G, YU X. Experimental study on capitalizing tailings again[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2007, 23(3):26-29.

[14] 廖秋实, 田承涛, 刘燕琴, 等. 磷尾矿的酸解及综合利用[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(6):58-59. LIAO Q S, TIAN C T, LIU Y Q, et

- al. Acid hydrolysis and comprehensive utilization of phosphorus tailings[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2023, 52(6):58-59.
- [15] 庞建涛, 肖喆, 刘润哲, 等. 云南某低品位硅钙质磷矿石工艺矿物学研究[J]. *化工矿物与加工*, 2018, 47(4):4-6. PANG J T, XIAO Z, LIU R Z, et al. Process mineralogy research on low grade silican-calcareous phosphate rock in Yunnan[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2018, 47(4):4-6.
- [16] 任韬宇, 李亚琳, 王朋顺, 等. 磷化工产业链副产物资源农业全量利用途径分析[J]. *现代化工*, 2024, 44(11):18-23. REN T Y, LI Y L, WANG P S, et al. Potential pathways for utilization of phosphorus chemical industrial chain by-products in agriculture[J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(11):18-23.
- [17] 李玉. 污泥堆肥用于矿山生态恢复中重金属的释放及迁移[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018. LI Y. Release and migration of heavy metals in sewage sludge compost application for abandoned mining land revegetation[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [18] 范志平, 王修俊, 程艳波, 等. 利用磷矿尾矿生产含磷生物肥料的探索[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(19):63-65. FAN Z P, WANG X J, CHENG Y B, et al. Exploration of using phosphate tailings producing bio-fertilizers with phosphorus[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(19):63-65.
- [19] 陈文旭, 李国学, 马若男, 等. Fe₂O₃对鸡粪堆肥过程中含硫臭气排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11):2465-2471. CHEN W X, LI G X, MA R N, et al. Effect of Fe₂O₃ on the emission of sulfur-containing odor during chicken manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2465-2471.
- [20] CHANG R X, LI Y M, CHEN Q, et al. Effects of carbon-based additives and ventilation rate on nitrogen loss and microbial community during chicken manure composting[J]. *PLoS One*, 2020, 15(9):e0229880.
- [21] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Organic fertilizers: NY/T 525—2021[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [22] 吕亮, 马盼, 巩少岩. 土壤中交换性钙和镁的测定 ICP-OES法[J]. *农学学报*, 2020, 10(11):48-52. LÜ L, MA P, GONG S Y. The determination of exchangeable Ca and Mg in soil by ICP-OES[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, 10(11):48-52.
- [23] 陈思力, 沈月. 原子荧光光谱法联合测定有机肥中砷、汞含量[J]. *特种经济动植物*, 2022, 25(10):46-48. CHEN S L, SHEN Y. Combined determination of arsenic and mercury content in organic fertilizers by atomic fluorescence spectroscopy[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2022, 25(10):46-48.
- [24] 祝富杰, 曲龙泽, 李平, 等. 恶臭污染的测定方法与预测模型研究进展[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2):13-19. ZHU F J, QU L Z, LI P, et al. Odor measurement methods and prediction models: a review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2):13-19.
- [25] 顾沈怡, 戴海洋, 郭凡婧, 等. 微生物和化学添加剂对畜禽粪便堆肥过程活性氮气体的减排研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8):1010-1018. GU S Y, DAI H Y, GUO F J, et al. Study on reduction of reactive gaseous nitrogen of compost product by microorganism and chemical additive in composting process of livestock and poultry manure[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(8):1010-1018.
- [26] ALVARENGA P, MOURINHA C, FARTO M, et al. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: benefits versus limiting factors[J]. *Waste Management*, 2015, 40:44-52.
- [27] 中华人民共和国农业部. 畜禽粪便无害化处理技术规范: NY/T 1168—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specification for harmless treatment of livestock and poultry manure: NY/T 1168—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [28] WANG G Y, KONG Y L, YANG Y, et al. Composting temperature directly affects the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in livestock manure[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 303:119174.
- [29] SUN S S, GUO C, WANG J Y, et al. Effect of initial moisture content, resulting from different ratios of vegetable waste to maize straw, on compost was mediated by composting temperatures and microbial communities at low temperatures[J]. *Chemosphere*, 2024, 357:141808.
- [30] 王海候, 吕志伟, 金梅娟, 等. 不同热解温度稻壳生物炭对羊粪堆肥腐熟度及温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(3):696-703. WANG H H, LÜ Z W, JIN M J, et al. Effects of rice husk biochar pyrolyzed at different temperatures on compost maturity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3):696-703.
- [31] 陈辉, 王巨媛, 田晓飞, 等. 含水率与C/N耦合对驴粪堆肥过程中温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(2):341-347. CHEN H, WANG J Y, TIAN X F, et al. Effects of different water content and C/N coupling on greenhouse gas emissions during donkey dung composting[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(2):341-347.
- [32] 陈同斌, 罗维, 高定, 等. 混合堆肥过程中容重的层次效应及动态变化[J]. *环境科学*, 2004, 25(5):143-147. CHEN T B, LUO W, GAO D, et al. Stratification of bulk density and its dynamics in the process of co-composting[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(5):143-147.
- [33] 秦翠兰, 王磊元, 刘飞, 等. 木醋液添加牛粪堆肥过程容重时空层次变化及水分时空变化的灰色关联分析[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4):482-485. QIN C L, WANG L Y, LIU F, et al. Grey correlation analysis of spatiotemporal changes in bulk density and moisture during the process of adding wood vinegar to cow manure compost[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2016, 44(4):482-485.
- [34] LIU Y W, FENG Y, CHENG D M, et al. Dynamics of bacterial composition and the fate of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during the co-composting with gentamicin fermentation residue and lovastatin fermentation residue[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 261:249-256.
- [35] 姜欣. 生物炭影响下的牛粪堆肥中真菌群落变化动态[D]. 哈尔

- 宾:东北农业大学, 2020. JIANG X. Fungal community succession under influence of biochar in cow manure composting[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [36] HE Z H, LIN H, HAO J W, et al. Impact of vermiculite on ammonia emissions and organic matter decomposition of food waste during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 263:548-554.
- [37] 丛文杰, 东东, 赵珊, 等. 高级厌氧消化各工艺节点污泥释放恶臭物质的影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2025, 45(3):205-210. CONG W J, DONG D, ZHAO S, et al. Impacting factors of odorant emissions from sludge at various steps of advanced anaerobic digestion process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(3):205-210.
- [38] GAO X Z, XU Z C, ZHANG L X, et al. Assimilatory sulphate reduction by acidogenesis: the key to prevent H₂S formation during food and green waste composting for sustainable urbanization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499:156149.
- [39] ZHANG D F, LUO W H, YUAN J, et al. Effects of woody peat and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2017, 68:56-63.
- [40] 于佳琳, 刘燕, 李佳明, 等. 硝化抑制剂 Nitrapyrin 对猪粪堆肥腐熟度、N₂O 排放以及氮损失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2025, 42(4):980-989. YU J L, LIU Y, LI J M, et al. The effect of nitrification inhibitor Nitrapyrin on maturity, N₂O emission and nitrogen loss during pig manure composting[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(4):980-989.
- [41] 王志慧, 杨新平, 茆军, 等. 外源菌剂对棉花秸秆堆肥过程中微生物群落及腐熟效果的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(10):1376-1384. WANG Z H, YANG X P, MAO J, et al. Influence of exogenous microbial agents on microbial community and maturity effect during cotton straw composting[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(10):1376-1384.
- [42] 冯圣霞. 电解锰渣预处理及在轻集料中的应用[D]. 贵阳:贵州大学, 2021. FENG S X. Pre treatment of electrolytic manganese slag and its application in lightweight aggregates[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [43] LI S Y, LI D Y, LI J J, et al. Effect of spent mushroom substrate as a bulking agent on gaseous emissions and compost quality during pig manure composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13):12398-12406.
- [44] JIANG T, MA X G, 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.
- [45] WEI L L, CHEN C R, XU Z H. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7):765-769.
- [46] CEREZINE P C, NAHAS E, BANZATTO D A. Soluble phosphate accumulation by *Aspergillus niger* from fluorapatite[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1988, 29(5):501-505.
- [47] 曹兴圆, 艾雯妍, 文思颖, 等. 有机酸提高土壤植酸生物有效性的机制、影响因素及应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11):2150-2171. CAO X Y, AI W Y, WEN S Y, et al. Mechanism, influencing factors and practical application of organic acids in improving soil phytate bioavailability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(11):2150-2171.
- [48] 周佳琦, 陈葵, 武斌, 等. 磷尾矿中钙镁的活化浸出实验研究[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(10):40-45. ZHOU J Q, CHEN K, WU B, et al. Experimental study on activation and leaching of calcium and magnesium from phosphate tailings[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49(10):40-45.
- [49] 潘婷. 厨余垃圾气流膜好氧堆肥影响因素及动力学研究[D]. 南京:东南大学, 2023. PAN T. Study on influencing factors and kinetics of airstream film aerobic composting of kitchen waste[D]. Nanjing:Southeast University, 2023.
- [50] LI Y, LUO W H, LI G X, et al. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250:53-59.
- [51] LI S Y, LI J J, SHI L H, et al. Role of phosphorous additives on nitrogen conservation and maturity during pig manure composting[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(14):17981-17991.
- [52] ELFADIL S, MEDDICH A, BOUTASKNIT A, et al. Roles of various composts based on phosphate flotation waste, phosphogypsum and *Cactus* in improving the tolerance of tomato plants to drought stress[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2022, 24(5):1832-1841.
- [53] CHEN Y H, HAN Y Y, KONG X Z, et al. Ectopic expression of wheat expansin gene *TaEXPA2* improved the salt tolerance of transgenic tobacco by regulating Na⁺/K⁺ and antioxidant competence[J]. *Physiologia Plantarum*, 2017, 159(2):161-177.
- [54] ZHANG S C, YANG R, HUO Y Q, et al. Expression of cotton *PLATZI* in transgenic *Arabidopsis* reduces sensitivity to osmotic and salt stress for germination and seedling establishment associated with modification of the abscisic acid, gibberellin, and ethylene signalling pathways[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18(1):218.
- [55] WU J, ZHANG A G, LI G X, et al. Effect of different components of single superphosphate on organic matter degradation and maturity during pig manure composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646:587-594.
- [56] LI S Y, LI D Y, LI J J, et al. Evaluation of humic substances during co-composting of sewage sludge and corn stalk under different aeration rates[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245:1299-1302.
- [57] 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.
- [58] 马闯, 扈斌, 刘福勇, 等. 有机废弃物好氧堆肥过程中微生物及酶活性变化状况综述[J]. *环境工程*, 2019, 37(9):159-164. MA C, HU B, LIU F Y, et al. Review on changes of microorganisms and enzyme activities during aerobic composting of organic waste[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(9):159-164.
- [59] 代浩, 李连龙, 包强, 等. 投加菌剂对清淤底泥好氧堆肥效果的强

- 化作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13): 70-76. DAI H, LI L L, BAO Q, et al. Aerobic composting performance of dredged sediment enhanced by microbial agent addition[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(13): 70-76.
- [60] TUMUHAIRWE J B, TENYWA J S, OTABBONG E, et al. Comparison of four low-technology composting methods for market crop wastes[J]. *Waste Management*, 2009, 29(8): 2274-2281.
- [61] 罗渊, 袁京, 李国学, 等. 种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 179185. LUO Y, YUAN J, LI G X, et al. Applicability of seed germination test to evaluation of low C/N compost maturity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 179185.
- [62] 李玉, 方文, 祁光霞, 等. 污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2786-2793. LI Y, FANG W, QI G X, et al. Changes in heavy metal speciation and release behavior before and after sludge composting[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2786-2793.
- [63] HARGREAVES J C, ADL M S, WARMAN P R. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(1/2/3): 1-14.
- [64] 鲍艳宇, 姜翼来, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属Pb、Cd、Cu、Zn的变化特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1820-1826. BAO Y Y, LOU Y L, YAN L, et al. Dynamic change characteristic of heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn during aerobic composting of different manure and the analysis of effect factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1820-1826.
- [65] WUANA R A, OKIEIMEN F E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation[J]. *ISRN Ecology*, 2011: 402647.
- [66] 张莉. 有机肥中重金属形态分析方法的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. ZHANG LI. Research on the method for characterizing heavy metal speciation in manure and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [67] 樊成, 唐欣, 刘运良. 腐植酸及其复配肥料中镉含量的测定[J]. 腐植酸, 2005(4): 31-32. FAN C, TANG X, LIU Y L. Assaying content of cadmium in humic acid and compound fertilizer therefrom [J]. *Humic Acid*, 2005(4): 31-32.
- [68] WANG Y Y, WEI Y Q, ZHOU K Y, et al. Regulating pH and *Phanerochaete chrysosporium* inoculation improved the humification and succession of fungal community at the cooling stage of composting [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 384: 129291.
- [69] 袁伟涛, 张婷, 马翠柳, 等. 畜禽粪污堆肥品质的提升策略[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(6): 25-35. YUAN W T, ZHANG T, MA C L, et al. Strategies for improving the quality of livestock manure compost [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2024, 52(6): 25-35.

(责任编辑: 宋潇)