

引用格式:

张浩东,覃思海,黄梦娇,罗熙哲,谢军,谢桂先. 不同矿物质添加剂对猪粪好氧堆肥腐殖化程度的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 59–67.

ZHANG H D, QIN S H, HUANG M J, LUO X Z, XIE J, XIE G X. Effects of different mineral additives on the degree of humification of swine manure in aerobic composting[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(4): 59–67.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同矿物质添加剂对猪粪好氧堆肥腐殖化程度的影响

张浩东¹, 覃思海¹, 黄梦娇¹, 罗熙哲¹, 谢军^{1,2,3}, 谢桂先^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙 410128; 2. 岳麓山实验室, 湖南 长沙 410128; 3. 土肥高效利用国家工程研究中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 通过分别向猪粪物料中添加其干物质质量分数10%的蛭石、沸石、麦饭石、膨润土和磁铁矿, 并采用好氧堆肥的方式研究不同矿物质添加剂对猪粪堆肥腐殖化程度的影响。结果表明: 在堆肥结束时, 各处理的pH差异无统计学意义; 与对照处理相比, 矿物添加剂处理延长了堆肥高温期, 使其电导率(EC)、总氮(TN)质量分数、发芽率(GI)和胡敏酸(HA)质量分数均显著上升, 总碳(TC)质量分数、碳氮比(C/N)和富里酸(FA)质量分数均显著下降; 膨润土处理的堆肥高温期增加了9 d, EC、TN质量分数、GI和HA质量分数分别显著提升了14.66%、30.50%、22.63%和45.36%, TC质量分数、C/N和FA质量分数显著下降了12.61%、33.02%和25.63%; 矿物质添加剂处理的HA与FA质量分数比(HA/FA)显著增加了71.82%~94.39%, 其中膨润土处理的效果最好; HA/FA与EC、C/N、GI及TC、TN、HA和FA质量分数呈极显著正相关关系, FA质量分数、TN质量分数、HA质量分数、C/N、TC质量分数、EC、GI对HA/FA的影响依次减小。综上, 添加膨润土能提高TN质量分数、GI、HA质量分数和HA/FA, 进而提高堆肥腐殖化程度, 因此, 建议在猪粪好氧堆肥过程中添加膨润土。

关键词: 猪粪堆肥; 矿物质添加剂; 膨润土; 腐殖酸; 腐殖化程度

中图分类号: S141.4; X713

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)04-0059-09

Effects of different mineral additives on the degree of humification of swine manure in aerobic composting

ZHANG Haodong¹, QIN Sihai¹, HUANG Mengjiao¹, LUO Xizhe¹, XIE Jun^{1,2,3}, XIE Guixian^{1,2,3*}

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Yuelushan Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China; 3. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In order to enhance the degree of humification in swine manure compost, this study employed aerobic composting by incorporating vermiculite, zeolite, maifanite, bentonite and magnetite, with each at a dry matter mass fraction of 10%, into the swine manure materials to investigate the effects of various mineral additives on the humification process of swine manure compost. Results indicated that at the end of composting no significant differences in pH were observed among the different treatments. Compared with the control treatment, the mineral additive treatments extended the high-temperature phase of composting and significantly increased the electrical conductivity(EC), total nitrogen(TN) mass fraction, germination index(GI) and humic acid(HA) mass fraction of compost, while the total carbon(TC) mass fraction, C/N ratio(C/N) and fulvic acid(FA) mass fraction of compost were all

收稿日期: 2024-11-13

修回日期: 2025-02-21

基金项目: 绿色种养循环试点项目(2022xczx-103)

作者简介: 张浩东(2000—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事农业有机废弃物肥料化利用研究, 15700706945@163.com; *通信作者, 谢桂先, 博士, 教授, 主要从事农业面源污染防控与农业有机废弃物肥料化利用研究, xieguixian@126.com

decreased significantly. The bentonite-treated samples increased the high-temperature phase by 9 days, with significant increasing in EC(14.66%), TN mass fraction(30.50%), GI(22.63%), and HA mass fraction(45.36%) of compost, while with this treatment, TC mass fraction(12.61%), C/N(33.02%), and FA mass fraction(25.63%) of compost decreased significantly. The mineral additive treatments significantly increased the HA/FA ratio of compost by 71.82% to 94.39%, with bentonite treatment showing the best effect. HA/FA showed extremely significant positive correlations with EC, C/N, GI, as well as with the mass fractions of TC, TN, HA and FA. The influence of FA mass fraction, TN mass fraction, HA mass fraction, C/N, TC mass fraction, EC, and GI on the HA/FA decreased in the following order. In summary, the addition of bentonite increased TN mass fraction, GI, HA mass fraction and HA/FA of compost, which in turn increased the degree of compost humification. Therefore, it is recommended to add bentonite to the aerobic composting process of swine manure.

Keywords: swine manure compost; mineral additive; bentonite; humic acid; degree of humification

据估测,我国每年畜禽粪便产量超 6×10^9 t^[1]。湖南省的畜禽粪便年产量约为 1×10^8 t, 其中约有 6×10^7 t 为猪粪^[2-3]。猪粪中 80%以上为有机物, 可以提供作物所需要的养分^[4], 但不合理利用会对环境造成严重的污染^[5]。好氧堆肥是实现猪粪资源化利用的有效方式^[6], 但也面临着腐殖化程度低等问题^[7-8], 如何提高好氧堆肥下猪粪腐殖化程度是亟需解决的关键问题。

矿物质添加剂(蛭石、沸石、麦饭石、膨润土及磁铁矿)具有易操作、低成本、多功能、来源天然等特点, 且本身可用作土壤调理剂^[9], 被广泛应用于好氧堆肥过程中^[10-11]。朱建伟^[12]的研究结果表明, 沸石能显著降低堆肥气体的排放量, 具有良好的保氮效果。王权^[7]的研究结果表明, 麦饭石可通过促进堆肥中木质素类纤维素等物质分解来提高堆肥腐殖化。REN 等^[13]的研究结果表明, 添加膨润土能显著提高堆肥的腐殖化程度。AYCAN DÜMENÇİ 等^[14]的研究结果表明, 添加蛭石可有效提高堆肥的成熟度。张立华^[15]的研究结果表明, 磁铁矿可促进氮素循环和有机质降解。综上, 前人的研究主要集中在单一矿物质添加剂对堆肥效果的影响, 但有关不同矿物质添加剂对好氧堆肥腐殖化程度影响的系统对比研究较少。因此, 本研究中, 以猪粪为原材料, 通过添加蛭石、沸石、麦饭石、膨润土及磁铁矿, 分析不同矿物质添加剂对猪粪好氧堆肥腐殖化程度的影响, 以期为猪粪高效、优质量堆肥利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

在湖南农业大学教学实践基地进行试验。原材

料为湖南省长沙市正大集团畜禽养殖场生产的压榨猪粪, 其含水量、总碳(TC)和总氮(TN)质量分数分别为 61.54%、438.15 g/kg 和 13.51 g/kg。以不添加矿物质添加剂为对照处理, 添加 10%矿物质添加剂为试验处理, 5 个处理分别添加蛭石、沸石、麦饭石、膨润土和磁铁矿, 共 6 个处理, 每个处理设置 3 次重复, 采用随机区组排列。堆体的碳氮比(C/N)保持在 30 左右, 含水量保持在 60%左右。试验在好氧堆肥反应器中进行, 好氧堆肥反应器的半径为 25 cm、高为 60 cm, 容积为 118 L, 在反应器外部包裹一层 4 cm 厚的保温棉。试验持续 45 d。

1.2 样品采集

分别于 0、4、10、17、24、31、38、45 d 对猪粪堆肥进行翻堆并采集样品。取样时在堆体分别选择 3 个不同位置和 3 个不同高度(共 9 个点)进行取样, 并将其混匀。将所采集的新鲜堆肥样品分为两部分, 一部分保存在 4 °C 冰箱内, 用于鲜样测定; 一部分进行风干、粉碎、过孔径 0.15 mm 的筛, 用于风干样测定。

1.3 指标测定与方法

参考文献[6]的方法, 采用 60 cm 数显探针式温度计测定堆温, 使用 pH 计和电导率仪分别测定 pH 和电导率(EC); 参考文献[16], 采用重铬酸钾容量法和凯氏定氮法分别测定 TC 和 TN 质量分数; 参照 NY/T 525—2021^[17], 采用种子发芽指数测定法测定发芽率(GI); 参考文献[10], 采用焦磷酸钠浸提—重铬酸钾容量法测定腐殖酸(HS)和胡敏酸(HA)质量分数, 富里酸(FA)质量分数为 HS 和 HA 质量分数的差值, 且参考文献[18], 采用 HA 与 FA 质量分数比(HA/FA)来解释堆肥的腐殖化程度, HA/FA 越

大, 表明堆体的稳定性越增强。

1.4 统计分析

运用 Origin 2018 和 Microsoft Office Excel 2010 进行绘图, 并选用 IBM SPSS 软件进行数据统计分析。同时, 采用 Mantel 检验分析 pH、EC、GI、TC、TN、C/N、HA 及 FA 对 HA/FA 的影响。此外, 使用 R 软件 4.4.1 版中的“Randomforest”软件包构建随机森林模型, 预测影响 HA/FA 的关键因素。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度和 pH 及 EC 的变化

从图 1 可知, 在堆肥初期所有处理的温度均呈上升趋势, 并在 4~5 d 时进入高温期; 对照、蛭石、沸石、麦饭石、膨润土和磁铁矿处理堆肥在 8~10 d 达到最高温度, 分别为 53.40、57.85、56.05、57.19、58.97、55.86 °C, 并且高温期持续时间分别为 5、12、10、11、14、9 d, 随后温度又逐渐降低。从图 2 可知, 随着堆肥时间延长, 各处理的 pH 的变化整体呈现先上升再趋于稳定的趋势; 堆肥结束时, 对

照、蛭石、沸石、麦饭石、膨润土和磁铁矿处理的 pH 分别为 8.02、8.10、8.08、8.20、8.14、8.17, 但是各处理间 pH 的差异无统计学意义。随着堆肥时间延长, 各处理的 EC 在堆肥过程中呈现上升的趋势。堆肥结束时, 5 种矿物质添加剂处理的 EC 均显著高于对照处理的, 相比对照处理, 各矿物添加剂处理的 EC 显著提升了 7.72%~14.66%; 相较于蛭石、沸石、麦饭石和磁铁矿处理, 膨润土处理的 EC 分别显著提升了 6.44%、3.92%、5.64%、5.54%。

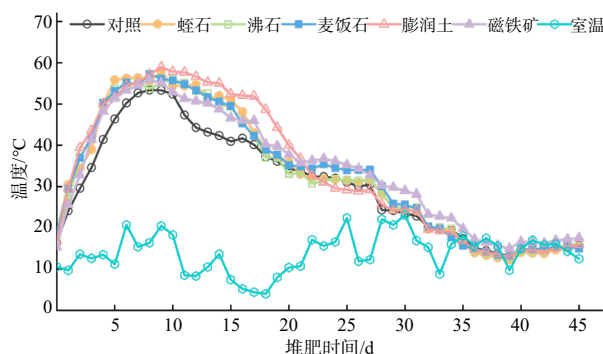
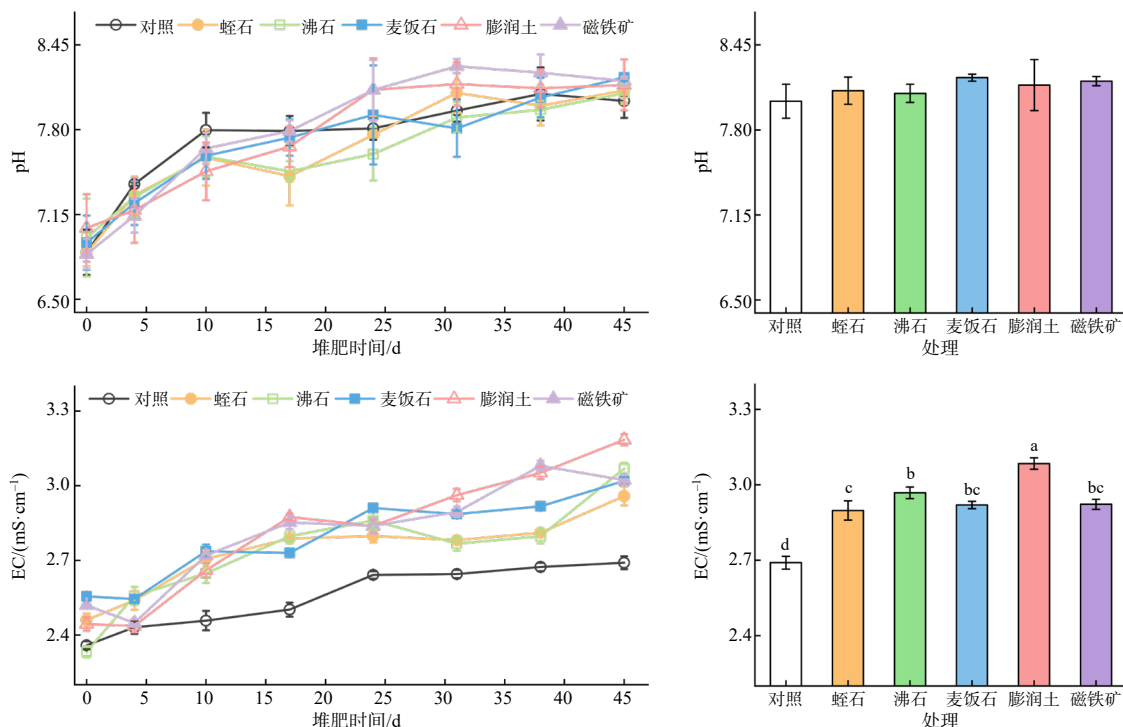


图1 堆肥过程中温度的变化

Fig.1 Changes in temperatures during the composting process



柱状图中数据为堆肥结束时的结果, 图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 堆肥过程中pH和EC的变化以及堆肥结束时的pH和EC

Fig.2 Changes in pH and EC during the composting process and the value of pH and EC at the end of composting

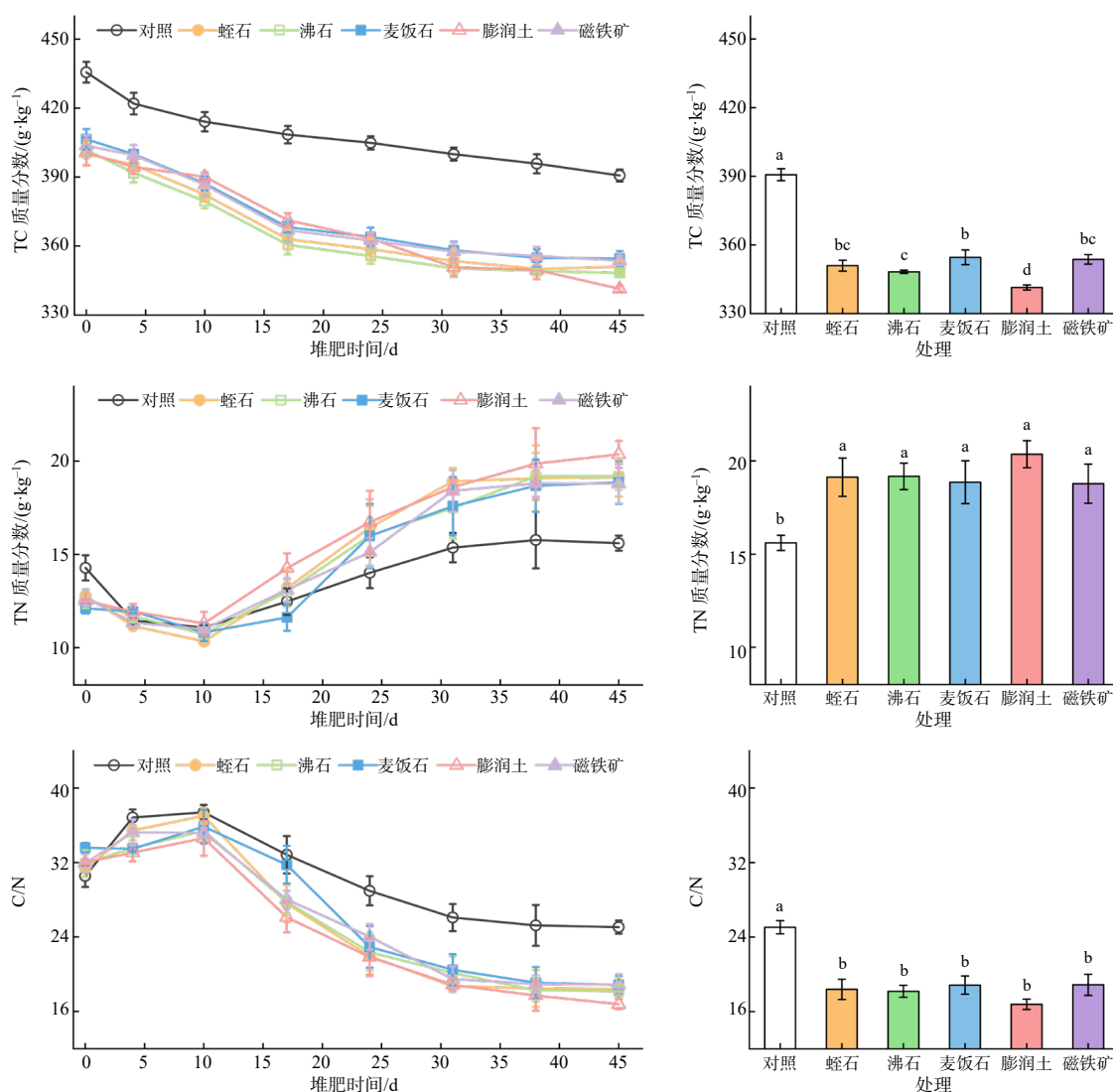
2.2 堆肥过程中TC和TN质量分数及C/N的变化

由图 3 可知, 在堆肥过程中, 各处理的 TC 质

量分数的变化整体呈现下降的趋势。堆肥结束时, 5 种矿物质添加剂处理的 TC 质量分数均显著低于

对照处理的,其下降幅度为 9.24%~12.61%;相较于蛭石、沸石、麦饭石和磁铁矿处理,膨润土处理的 TC 质量分数分别显著下降了 2.72%、1.97%、3.72%和 3.47%。随着堆肥时间延长,各处理的 TN 质量分数呈现先下降后上升的趋势;堆肥结束时,相比对照处理,矿物质添加剂处理的 TN 质量分数显著增加了 20.38%~30.50%,但是各矿物质添加剂

处理间的 TN 质量分数差异无统计学意义。在堆肥的初始阶段,各组的 C/N 逐渐增加,但 10 d 后开始逐渐下降;堆肥结束时,矿物质添加剂处理的 C/N 均显著低于对照处理的,与对照处理相比,5 种矿物质添加剂处理的 C/N 下降幅度为 24.66%~33.02%,但各矿物质添加剂处理间 C/N 的差异无统计学意义。



柱状图中数据为堆肥结束时的结果,图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图3 堆肥过程中TC和TN质量分数与C/N的变化以及堆肥结束时的TC和TN质量分数与C/N

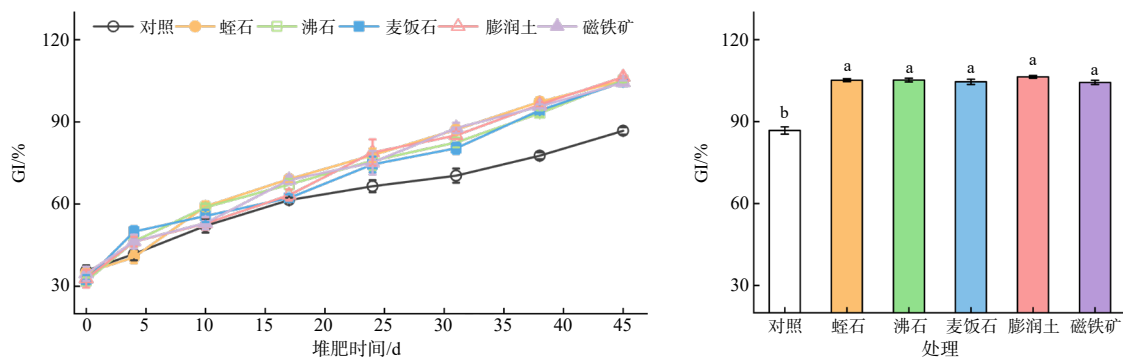
Fig.3 Changes in the mass fractions of TC, TN and C/N during the composting process and the mass fraction of TC, TN and C/N at the end of composting

2.3 堆肥过程中GI的变化

从图 4 可知,随着堆肥时间延长,各处理的 GI 呈逐渐上升的趋势;堆肥结束时,相比对照处理,5 种矿物质添加剂处理的 GI 显著提升了 20.30%~22.63%,但各矿物添加剂处理间 GI 的差异无统计学意义。

2.4 堆肥过程中腐殖酸的变化

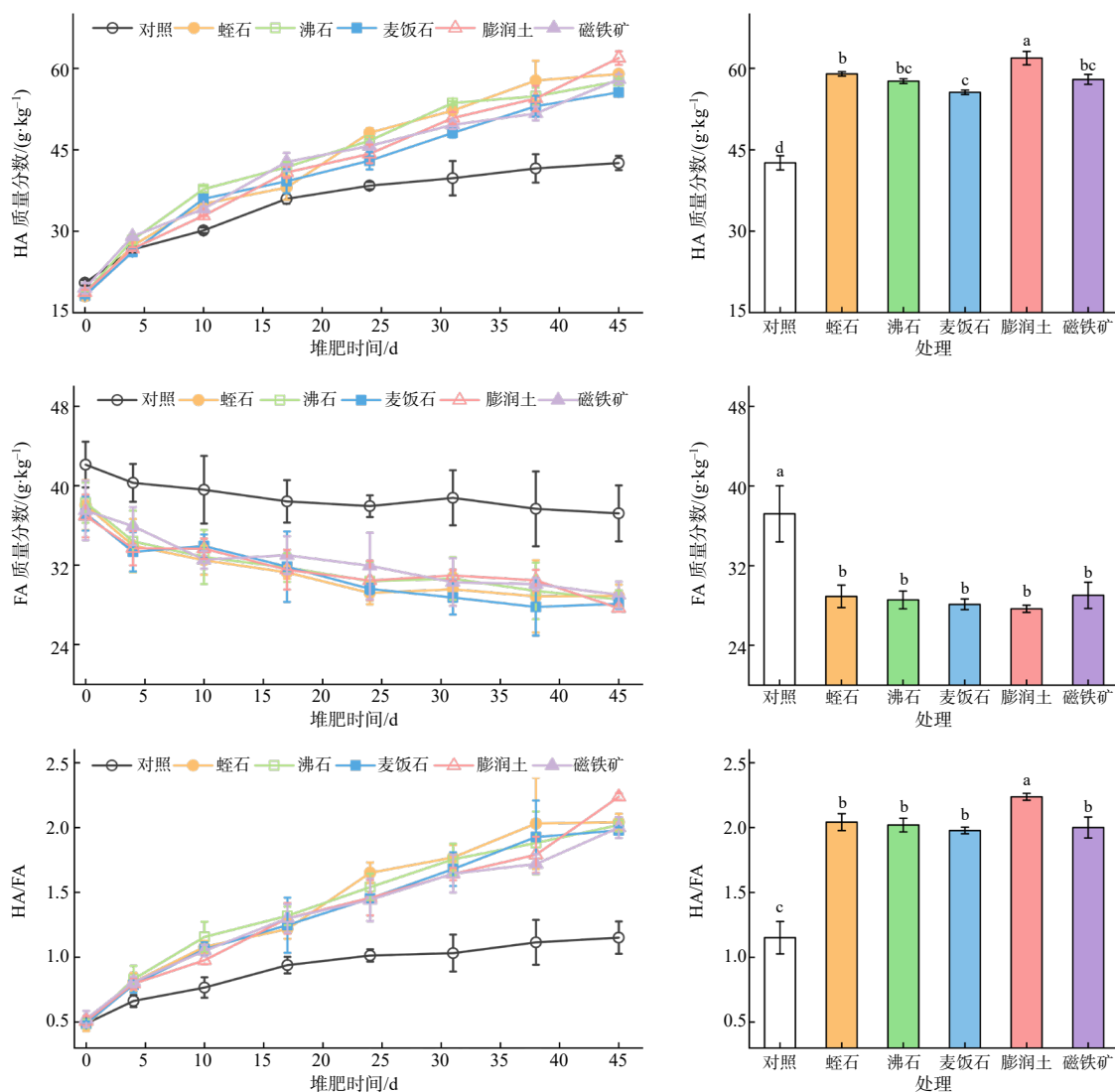
从图 5 可知,在堆肥过程中,各处理的 HA 质量分数整体呈现逐渐上升的趋势。堆肥结束时,相比对照处理,5 种矿物质添加剂处理的 HA 质量分数显著提升了 30.54%~45.36%;此外,相比蛭石、沸石、麦饭石和磁铁矿处理,膨润土处理的 HA 质



柱状图中数据为堆肥结束时的结果, 图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图4 堆肥过程中GI的变化和堆肥结束时的GI

Fig.4 Changes in germination index during the composting process and germination index at the end of composting



柱状图中数据为堆肥结束时的结果, 图柱上不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图5 堆肥过程中HA和FA质量分数与HA/FA的变化以及堆肥结束时的HA和FA质量分数与HA/FA

Fig.5 Changes in the mass fractions of HA, FA and HA/FA during the composting process and the mass fractions of HA, FA and HA/FA at the end of composting

量分数分别显著提高了 4.94%、7.38%、11.35%和 6.78%。在整个堆肥过程中, 各处理的 FA 质量分数

整体呈现逐渐下降的趋势; 堆肥结束时, 5 种矿物质添加剂处理的 FA 质量分数均显著低于对照处理

的,其下降幅度为 22.01%~25.63%,但各矿物质添加剂处理间的 FA 质量分数差异无统计学意义。在整个堆肥过程中,各处理的 HA/FA 逐渐上升。堆肥结束时,5 种矿物质添加剂处理的 HA/FA 均显著高于对照处理的,增加幅度为 71.82%~94.39%;相比于蛭石、沸石、麦饭石和磁铁矿处理,膨润土处理的 HA/FA 分别显著提升了 9.58%、10.79%、13.13% 和 11.85%。

2.5 堆肥各腐熟指标对 HA/FA 的影响

Mantel 检验分析结果(图 6)表明,HA/FA 与 EC、C/N、GI 及 TC、TN、HA 和 FA 质量分数存在极显著正相关关系。随机森林模型预测结果(图 7)表明,FA 质量分数、TN 质量分数、HA 质量分数、C/N、TC 质量分数、EC、GI 对 HA/FA 的影响依次减小。

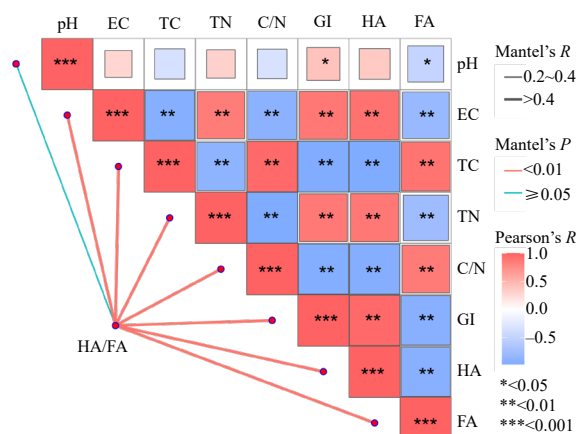


图6 HA/FA与堆肥各腐熟指标的Mantel检验分析结果

Fig.6 Mantel test analysis results for HA/FA and composting maturity indicators

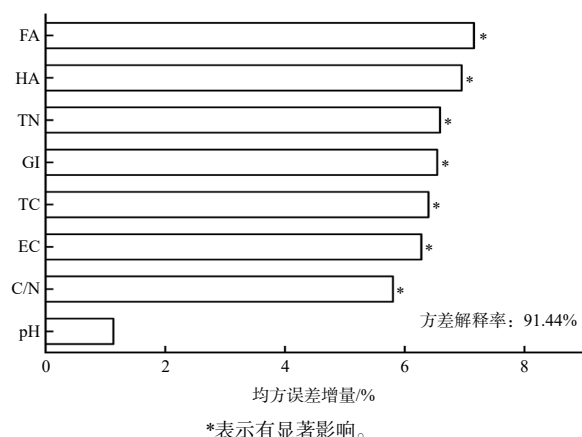


图7 随机森林模型预测结果

Fig.7 Random forest model prediction results

3 结论与讨论

堆体温度是好氧堆肥的关键因素^[6],反映了堆

肥效率和微生物活性^[19]。本研究中,各矿物质添加剂处理的高温期持续时间均大于 4 d,高温能够有效破坏病原体 and 杂草种子,确保堆肥满足卫生标准要求^[10]。相比于其他矿物添加剂处理,膨润土处理延长了高温期,这可能是由于膨润土孔隙率高,可以增加通气量,并提高持水和固水能力,减少堆肥体系内由于水分挥发造成的热量损失,从而起到了保温作用^[19]。

堆肥过程中 pH 的变化可反映微生物分解有机质所产生的有机酸含量变化的过程^[19]。本研究中,不同处理的 pH 随着堆肥时间延长表现为增加的趋势,这是因为在堆肥初期,堆体温度不断升高,有机氮快速降解,逐渐被微生物氨化为氨态氮^[20],所以堆体的 pH 不断升高。此外,在堆肥结束时,各处理 pH 为 8.02~8.20,这与农业应用要求^[17]的堆肥产品 pH 范围(5.5~8.5)相符合。

堆肥的 EC 可以反映物料含盐量,是评估堆肥产品对植物生长的抑制作用或生物毒性的重要指标^[21]。本研究中,堆肥 EC 随着堆肥时间延长逐渐升高,这可能是因为有机物快速降解会不断释放盐分^[22],堆肥质量损失会导致盐分浓缩^[23]。堆肥结束时,膨润土处理的 EC 显著高于其余处理的,这与王权^[7]的研究结果一致。此外,堆肥结束时,各处理猪粪堆肥的 EC 为 2.69~3.08 mS/cm,均低于 NY/T 525—2021 中的限值(4.00 mS/cm)^[17],由此可见,本研究中各处理猪粪堆肥均符合标准,对植物生长具有促进作用^[24]。

本研究中,随着堆肥时间延长,各处理的 TC 质量分数逐渐降低,且堆肥结束时,各矿物质添加剂处理的 TC 质量分数均显著低于对照处理的。在堆肥过程中,TC 是微生物的主要能量来源,微生物会利用这些碳源进行生命活动,包括有机物的分解和转化^[25-26]。矿物质添加剂可以有效促进堆肥 TC 降解,这可能是因为矿物质具有较强的吸附能力、巨大的比表面积及丰富的孔隙结构等特性,可以为微生物提供更加适宜的微环境,从而促进了微生物的新陈代谢活动^[7-8],进而加速了 TC 的降解。此外,相比其他矿物添加剂处理,膨润土处理的 TC 降解效果最好,这与蔡琳琳等^[27]的研究结果相似,这可能是因为膨润土的亲水面与粪肥的疏水面结合以及膨润土自身多孔性的表面特性,能够增加物

料中微生物的生物活性,加快了木质纤维素的降解,进而更加有效地促进了 TC 的降解效果^[19,28]。

堆肥初期,各处理 TN 质量分数呈现降低的趋势,这是由于堆肥初期温度升高,导致氨气挥发等氮素损失^[29],此外,由于升温阶段微生物活性强,干物质减少率小于氮素消耗率,使 TN 质量分数相对降低^[30]。随着堆肥过程的进行,堆肥有机质不断被分解并以 CO₂、CH₄、水蒸气和有机酸等形式逸散^[31],导致堆肥物料的质量与体积不断下降^[32],当此下降速率远超氮素损失速率时就会产生浓缩效应,从而导致 TN 质量分数开始增加^[33],这就是堆肥中后期各处理 TN 质量分数增加的原因。

堆肥 C/N 是检验堆肥产品腐熟度的常用指标,当堆肥 C/N 下降到 20 即可认为堆肥达到腐熟^[34]。本研究中,在堆肥结束时,除对照处理外,其余各处理的 C/N 均低于 20,表明添加矿物质可有效促进堆肥腐熟,这与蔡琳琳等^[27]的研究结果相同。

堆肥 GI 是用来反映有机肥的毒性和腐熟程度的常用指标^[35]。堆肥初期,各处理 GI 较低,是因为堆肥初期物料含有挥发性脂肪酸及水溶性小分子有机酸等,会对种子萌发产生抑制作用^[10]。随着时间的推移,堆体中氨、有机酸等植物毒性物质降解加速,堆体内的有毒物质减少^[27,36],致使堆肥后期 GI 逐渐增加。GI 大于 50%时说明堆肥产品对植物生长无害,GI 大于 80%则说明堆肥达到腐熟^[34]。本研究中,堆肥结束时,各处理的 GI 均大于 80%,说明各处理堆肥产品均完成腐熟,其中矿物质添加剂处理腐熟完成度更高。

腐殖化程度是指堆肥过程中有机物经过矿化、腐殖化过程后达到稳定化的程度^[37],会直接影响堆肥产品的质量^[38-39]。本研究中,HA 质量分数呈现逐渐上升的趋势,这与任秀娜^[10]和 ZHOU 等^[40]的研究结果一致。这是因为随着堆肥的进行,微生物不断矿化分解 FA^[41]和木质素、纤维素、半纤维素等难降解有机物^[42],其过程中产生的中间产物不断缩合,生成多聚体后形成结构复杂、稳定的 HA^[43]。膨润土处理的 HA 质量分数显著高于其余处理的,这可能是因为其丰富的孔隙结构可以增加物料的孔隙率并且加快物料中氧气的扩散和流通,为堆体创造疏松富氧的环境,使得参与降解纤维素、半纤维素和木质纤维素的厚壁菌门、梭菌纲和芽孢杆菌

纲等关键微生物大量繁殖^[28],进而促进了 HA 的生成。在堆肥过程中,各处理的 FA 质量分数呈现逐渐下降的趋势,这是由于 FA 分子量相对较小且分子结构简单^[44],易被微生物矿化分解为其生命活动提供能量^[45]。此外,HA 与 FA 之间具有一定的转化关系^[37]。一般而言,HA/FA 可以用来解释堆肥的腐殖化程度^[37]。本研究中,各处理的 HA/FA 均呈现上升的趋势,这表明堆体的稳定性不断增强^[18]。此外,影响 HA/FA 变化的最主要因素为 FA 质量分数,这可能是因为 FA 通常具有较低的分子量和较高的官能团含量,这使得 FA 在堆肥过程中具有更高的溶解性和生物可利用性^[46],FA 可能会更容易参与到堆肥过程中有机物的分解和腐殖化,从而对 HA/FA 产生更大的影响。堆肥结束时,膨润土处理的 HA/FA 显著高于其余处理的,表明膨润土处理的腐殖化程度最高,可能是因为膨润土具有遇水膨胀的特性^[47],有助于改善堆体的物理结构,增强通气性和持水能力,为微生物新陈代谢提供更好的微环境,进而促进了堆肥的腐殖化过程。

综上可知,本研究中,矿物质添加剂处理延长了堆肥高温期的维持时间,其中,膨润土处理的高温期维持了 14 d;与对照处理相比,堆肥结束时,各矿物质添加剂处理的猪粪堆肥的 TC 质量分数显著下降了 9.24%~12.61%,TN 质量分数显著增加了 20.38%~30.50%,HA 质量分数显著增加了 30.54%~45.36%,HA/FA 显著增加了 71.82%~94.39%,表明添加矿物质添加剂均可以促进猪粪堆肥腐殖化程度;相比其他矿物添加剂,堆肥结束时,膨润土处理猪粪堆肥的 TC 质量分数显著下降了 1.97%~3.72%,HA 质量分数显著提高了 4.94%~11.35%,HA/FA 显著提升了 9.58%~13.13%,表明添加膨润土更有利于堆肥中 TC 的降解,并且可以增加堆肥 HA 的积累和 HA/FA,提高猪粪堆肥腐殖化程度。因此,在猪粪好氧堆肥中推荐添加膨润土。

参考文献:

- [1] XUE Y, LIU X M. Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 130349.
- [2] ARGÜESO-MATA M, BOLADO S, JIMÉNEZ J J, et al. Determination of antibiotics and other veterinary drugs in the solid phase of pig manure[J]. Chemosphere, 2021,

- 275: 130039.
- [3] 湖南省统计局, 国家统计局湖南调查总队. 湖南统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [4] 冀红柳, 尹苗, 吴倩, 等. 猪粪堆肥用微生物及其效果研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(7): 30–35.
- [5] YANG Y J, AWASTHI M K, DU W, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122435.
- [6] 黄引超, 董晨曦, 袁京, 等. 生物炭对放牧绒山羊羊粪堆肥腐熟度及臭气排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 157–168.
- [7] 王权. 添加剂对猪粪好氧堆肥过程的影响及其机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [8] 王旭杰, 张文明, 常馨怡, 等. 堆肥添加剂降低碳氮损失的微生物学机制研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4116–4127.
- [9] 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.
- [10] 任秀娜. 矿物材料对畜禽粪便好氧堆肥碳氮转化的影响机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [11] BARTHOD J, RUMPEL C, DIGNAC M F. Composting with additives to improve organic amendments. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, 38(2): 17.
- [12] 朱建伟. 不同添加剂对牛粪堆肥微生物群落结构及除臭效果的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [13] REN X N, AWASTHI M K, WANG Q, et al. New insight of tertiary-amine modified bentonite amendment on the nitrogen transformation and volatile fatty acids during the chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 266: 524–531.
- [14] AYCAN DÜMENÇİ N, CAGCAG YOLCU O, AYDIN TEMEL F, et al. Identifying the maturity of co-compost of olive mill waste and natural mineral materials: modelling via ANN and multi-objective optimization[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 338: 125516.
- [15] 张立华. 基于纳米材料调控的农业废物堆肥化性能及相关功能微生物研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] NY/T 525—2021. 有机肥料[S].
- [18] 杨航波, 张韵, 郑威, 等. 竹醋添加时期对猪粪堆肥腐殖质形成的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(9): 1–9.
- [19] 梁梦月, 袁宁, 于锐, 等. 酸碱改性生物炭与膨润土复配提高猪粪堆肥 Cu 和 Zn 钝化率[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(9): 2126–2133.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] WANG Q, LI R H, CAI H Z, et al. Improving pig manure composting efficiency employing Ca-bentonite[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 157–161.
- [25] 张玉凤, 田慎重, 边文范, 等. 有机物料对牛粪好氧堆肥过程的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(5): 76–82.
- [26] 马丽婷, 徐智, 赵兵, 等. 不同时期接种黄孢原毛平革菌对稻壳和鸡粪堆肥腐殖化的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1522–1530.
- [27] 蔡琳琳, 李素艳, 康跃, 等. 沸石、膨润土和过磷酸钙对蚯蚓堆肥园林绿化废弃物腐熟效果的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 299–309.
- [28] 朱桃川, 李泽康, 明玉飞, 等. 膨润土和腐植酸对猪粪堆肥 Zn、Cu 钝化和微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 937–946.
- [29] 李云. 添加剂对好氧堆肥过程中含氮气体排放和氮素化合物转化的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [30] 李森, 罗雪梅, 涂卫国, 等. 保氮剂对水葫芦堆肥进程及氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1197–1203.
- [31] 吴梦婷. 化学添加剂控制牛粪好氧堆肥氮损失效果的研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
- [32] WEI Y Q, ZHAO Y, FAN Y Y, et al. Impact of phosphate-solubilizing bacteria inoculation methods on phosphorus transformation and long-term utilization in composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 134–141.
- [33] 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.
- [34] 姜义晟, 吴昊, 徐智, 等. 不同碳氮比条件对鸡粪和稻壳高温堆肥腐熟度的影响[J]. 辽宁农业科学, 2023(3): 21–25.
- [35] AWASTHI M K, WANG Q, HUANG H, et al. Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 172–181.
- [36] 黄艳艳, 杨旭, 杨红竹, 等. 碳氮比对热带地区鸡粪

- 和蔗渣堆肥腐熟进程的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(21): 61–68.
- [37] 成志远, 邱慧珍, 苏杨琴, 等. 不同 pH 值对牛粪–小麦秸秆好氧堆肥过程中碳转化特征及腐熟度的影响[J]. 热带农业工程, 2024, 48(1): 125–135.
- [38] ZHAO Y, ZHAO Y, ZHANG Z C, et al. Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting[J]. Waste Management, 2017, 68: 64–73.
- [39] ZHAO X Y, WEI Y Q, FAN Y Y, et al. Roles of bacterial community in the transformation of dissolved organic matter for the stability and safety of material during sludge composting[J]. Bioresource Technology, 2018, 267: 378–385.
- [40] ZHOU Y, SELVAM A, WONG J W C. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues[J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 229–234.
- [41] YANG Y J, DU W, REN X N, et al. Effect of bean dregs amendment on the organic matter degradation, humification, maturity and stability of pig manure composting[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 134623.
- [42] KULIKOWSKA D. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting[J]. Waste Management, 2016, 49: 196–203.
- [43] ABDELLAH Y A Y, LI T Z, CHEN X, et al. Role of psychrotrophic fungal strains in accelerating and enhancing the maturity of pig manure composting under low-temperature conditions[J]. Bioresource Technology, 2021, 320: 124402.
- [44] 赵桂红. 烟草废弃物堆肥过程控制及促腐研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [45] WANG Q, AWASTHI M K, REN X N, et al. Comparison of biochar, zeolite and their mixture amendment for aiding organic matter transformation and nitrogen conservation during pig manure composting[J]. Bioresource Technology, 2017, 245(Part A): 300–308.
- [46] ZHAO B, WANG Y Y, SUN H R, et al. Analysis of humus formation and factors for driving the humification process during composting of different agricultural wastes[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 954158.
- [47] 张祖尧. 膨润土研究进展综述[J]. 环境保护前沿, 2019(3): 496–501.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正