

## 添加沼渣对餐厨垃圾堆肥腐殖化过程的影响

李龙涛, 董春华, 饶中秀, 张娜, 李微艳, 褚飞, 黄凤球

### 引用本文:

李龙涛, 董春华, 饶中秀, 张娜, 李微艳, 褚飞, 黄凤球. 添加沼渣对餐厨垃圾堆肥腐殖化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1148–1155.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1103>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 餐厨浆液沼渣与黑水虻虫粪共堆肥效能研究

张浩, 阮文权, 刘皓, 肖小兰

农业环境科学学报. 2022, 41(5): 1108–O23–1 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1259>

#### 餐厨垃圾生化尾渣蚯蚓堆肥中矿物的调节效应

缪丽娟, 王依凡, 张明月, 应雨瑾, 张承业, 冯宇宁, 王浪, 朱维琴

农业环境科学学报. 2022, 41(2): 425–433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0623>

#### 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>

#### 麦秸秸秆花盆堆肥化研究及评价

黄红英, 孙恩惠, 武国峰, 曲萍, 常志州, 徐跃定

农业环境科学学报. 2015(12): 2386–2393 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.019>

#### 葡萄枝堆肥腐殖化的微生物养分限制机理探讨

齐熙平, 黄懿梅, 贾鹏辉, 刘一帆, 谢健宇, 傅彬欣, 李建波

农业环境科学学报. 2023, 42(4): 901–911 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0895>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李龙涛, 董春华, 饶中秀, 等. 添加沼渣对餐厨垃圾堆肥腐殖化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1148–1155.

LI L T, DONG C H, RAO Z X, et al. Effects of biogas residue addition on humification of kitchen waste compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 1148–1155.

## 添加沼渣对餐厨垃圾堆肥腐殖化过程的影响

李龙涛, 董春华, 饶中秀, 张娜, 李微艳, 褚飞, 黄凤球\*

(湖南省土壤肥料研究所, 湖南省新型肥料工程技术研究中心, 长沙 410125)

**摘要:**为探讨添加沼渣对餐厨垃圾堆肥腐殖化过程的影响,设计餐厨垃圾:沼渣的干基比例分别为4:0(T1)、3:1(T2)和1:3(T3) 3个处理,以水稻秸秆作为辅料进行条垛式堆肥。通过测定堆体温度、干物质含量、种子发芽指数以及总氮、总有机碳、胡敏酸和富里酸含量,分析堆体的物料降解、腐殖化程度、碳氮损失和堆肥品质等。结果表明:随着沼渣比例的增加,堆肥的有效积温比、腐殖质聚合度、腐殖化指数均上升;50 d完成堆肥时,T2处理具有最高的干物质降解率(37.16%)、氮含量( $23.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和种子发芽指数(90.59%),并具有较高的有效积温比(63.73%)、腐殖质聚合度(0.84)和腐殖化指数(7.78%)。研究发现,添加沼渣提高了餐厨垃圾堆肥高温期发酵效率,强化了堆肥腐殖化作用,同时也增加了碳、氮损失。

**关键词:**堆肥;餐厨垃圾;沼渣;物质降解;腐殖化

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-1148-08 doi:10.11654/jaes.2022-1103

### Effects of biogas residue addition on humification of kitchen waste compost

LI Longtao, DONG Chunhua, RAO Zhongxiu, ZHANG Na, LI Weiyan, CHU Fei, HUANG Fengqiu\*

(Hunan Soil and Fertilizer Institute, Hunan New Type Fertilizer Engineering and Technological Research Center, Changsha 410125, China)

**Abstract:** In order to better understand the influence of biogas residue addition on humification of kitchen waste compost, three treatments were designed. In these three treatments, the ratio of kitchen waste and biogas residue were: 4:0(T1); 3:1(T2); 1:3(T3). Rice straw was used as an auxiliary material for strip composting. The material degradation, humification degree, carbon and nitrogen loss, and compost quality of the kitchen waste were determined by measuring compost temperature, dry matter content, seed germination index, and total nitrogen, total organic carbon, humic acid, and fulvic acid content. The results of this study indicated that the available accumulated temperature ratio, degree of humus polymerization, and humification index of composting increased with the proportion of biogas residue. After 50 d, when composting was finished, the T2 treatment had the highest material degradation rate (37.16%), nitrogen content ( $23.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and germination index (90.59%). It also had a high available accumulated temperature ratio (63.73%), degree of humus polymerization(0.84), and humification index(7.78%). This study found that adding biogas residue improved the fermentation efficiency at the thermophilic stage of kitchen waste compost, enhanced the humification, and increased carbon and nitrogen losses.

**Keywords:** compost; kitchen waste; biogas residue; material degradation; humification

收稿日期:2022-11-02 录用日期:2023-02-01

作者简介:李龙涛(1991—),男,山东济宁人,助理研究员,主要研究方向为有机废弃物资源化利用。E-mail:lilt@hunaas.cn

\*通信作者:黄凤球 E-mail:839734142@qq.com

基金项目:湖南省农业科技创新基金项目(2022CX74,2021CX37);湖南省自然科学基金项目(2020JJ4410)

Project supported: Hunan Agricultural Science and Technology Innovation Fund Program(2022CX74,2021CX37); Natural Science Foundation of Hunan Province, China(2020JJ4410)

2021年我国城市生活垃圾清运量达2.49亿t,其主要无害化处理方式是填埋和焚烧,约占总处理量的93.5%,其中约36%~52%为餐厨垃圾<sup>[1-2]</sup>。填埋焚烧不仅造成温室气体、渗滤液和臭气排放等环境污染问题,而且浪费了其中的可利用资源<sup>[3]</sup>。近年来有机废弃物的高效资源化利用倍受关注,好氧堆肥作为有效的资源利用技术,具有低成本、操作简单等特点,已经广泛应用于处置畜禽粪污、作物秸秆、餐厨垃圾和园林垃圾等废弃物<sup>[4-5]</sup>。餐厨垃圾堆肥存在发酵周期长、腐解效率低和产品品质不稳定等瓶颈<sup>[6]</sup>,提高堆肥腐殖化效率仍是当前研究的主要任务和难点。

国内外提升餐厨垃圾堆肥效果的研究主要有2个方面,一是通过添加功能性调理剂,如生物炭、粉煤灰、菇渣、污泥等,通过调节物料C/N、pH、水分、透气性等参数以改良堆肥效果<sup>[7]</sup>。如将污泥添加到餐厨垃圾中协同堆肥,可以显著提高多糖和蛋白质的降解率,强化堆肥的腐殖化作用<sup>[8]</sup>。二是直接添加微生物发酵剂以强化优势菌群,如在餐厨垃圾和园林废弃物共堆肥中接种功能性微生物后,物料中的木质纤维素降解率提高了0.6倍<sup>[9]</sup>。但是由于餐厨垃圾特性复杂,使分离自其他环境中的降解菌在餐厨垃圾堆肥体系中作用有限,如外源细菌的生长往往被餐厨垃圾原生优势菌群乳酸菌抑制<sup>[10]</sup>。因此筛选兼具调理作用和生物强化作用的添加剂值得进一步研究。

沼渣是有机物料厌氧发酵后的产物,其养分含量高而C/N低,具有较高的微生物多样性,富含多种代谢产物如多酚氧化酶、纤维素酶、脲酶等,添加沼渣既可以通过调节理化参数影响微生物活动,其自身丰富的菌群也能提高堆肥的微生物多样性<sup>[11]</sup>。有研究表明,将沼渣添入牛粪中堆肥可以通过强化微生物活性提高C和N的生物利用率<sup>[12]</sup>;将餐厨浆液沼渣与黑水虻虫粪共同堆肥可以提高胡敏酸的含量和腐殖化程度<sup>[13]</sup>。但是目前鲜有利用沼渣强化餐厨垃圾堆肥腐殖化作用的研究<sup>[14]</sup>。

本研究以添加沼渣比例为控制变量,通过研究餐厨垃圾腐殖化指标和C、N变化,明确沼渣强化餐厨垃

圾腐殖化作用的可行性,并探讨餐厨垃圾和沼渣协同堆肥C、N损失规律。本研究可以为餐厨废弃物资源高效利用提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究中沼渣为城市厨余废液厌氧发酵后沉淀的固体废渣,餐厨垃圾是城市厨余分离油水后直接粉碎的固体废渣,辅料为水稻秸秆。试验材料的基本性质见表1。

### 1.2 试验设计

试验地点位于长沙市某有机肥企业生产车间。试验设计餐厨垃圾:沼渣干基比例分别为4:0(T1)、3:1(T2)和1:3(T3)3个处理。提前收集水稻秸秆粉碎至1cm左右,各处理秸秆添加的干基比例均为56%左右以调节物料C/N至约25。通过添加水分调节各处理的初始含水率至60%左右,同时用铲车和翻抛机将物料充分混匀,堆成长2.5~3.0m,宽2.0m,高1.5m左右的条垛进行发酵。堆体升温至60℃时开始翻堆,高温期2~3d翻堆1次,降温期7d左右翻堆1次,温度降低至40℃时不再翻堆,直至温度下降至环境温度后完成堆肥,堆肥周期共50d。

### 1.3 采样与检测

#### 1.3.1 采样方法

第0、5、10、20、30天和50天采样,堆体根据长度确定3个等距截面,每个截面以高度均分为上、中、下3层,用取样器分别在截面的每一层取样品300g,混匀后为1个完整样品,每个截面采集1个样品,每个处理共采3个样品。样品用自封袋密封,带回实验室检测分析各项指标。

#### 1.3.2 检测内容与方法

总氮(TN)的测定采用凯氏定氮法;总有机碳(TOC)的测定采用重铬酸钾氧化-外加加热法;腐殖质组成的测定采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化法。

温度测定及积温计算:使用电子温度计,于每日16:00分别在堆体上、中、下3层中部读数,取平均值

表1 原材料的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of raw materials

原材料 Raw material	pH	含水率 Moisture content/%	总氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总钾 Total potassium/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )
沼渣 Biogas residue	6.88	80.84	29.8	32.7	7.6	462.2
餐厨垃圾 Kitchen waste	6.28	43.75	39.7	21.5	7.7	733.7
水稻秸秆 Rice straw	6.45	7.97	11.6	2.9	34.5	828.3

代表堆体温度,每个处理重复测定3次。采用陈同斌等<sup>[15]</sup>的方法计算堆肥积温和有效积温比。

干物质降解率(DR)的测定和总有机碳损失率(CL)、总氮损失率(NL)的计算:DR的测定采用尼龙网袋法,在起堆完成后立即精确称量1 kg物料装入尼龙网袋中,每个处理准备3袋物料分别放入堆体3个等距截面的中层,在第10、20、30、40天和50天将网袋称质量后放回堆体,同时取样测定物料含水率,参照班允赫和高文慧<sup>[16-17]</sup>的方法计算DR、CL和NL。计算公式如下:

$$DR = [(M_0 - M_i) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$NL = [(M_0 \times N_0 - M_i \times N_i) / (M_0 \times N_0)] \times 100\% \quad (2)$$

$$CL = [(M_0 \times C_0 - M_i \times C_i) / (M_0 \times C_0)] \times 100\% \quad (3)$$

式中: $M_0$ 为物质初始质量,kg; $M_i$ 为物质在*i*时刻的质量,kg; $N_0$ 为物质初始TN, $g \cdot kg^{-1}$ ; $N_i$ 为物质在*i*时刻的TN, $g \cdot kg^{-1}$ ; $C_0$ 为物质初始TOC, $g \cdot kg^{-1}$ ; $C_i$ 为物质在*i*时刻的TOC, $g \cdot kg^{-1}$ 。

腐殖质聚合度(DP)、腐殖化率(HR)和腐殖化指数(HI)的计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$DP = HA/FA \quad (4)$$

$$HR = [(HA + FA) / TOC] \times 100\% \quad (5)$$

$$HI = (HA/TOC) \times 100\% \quad (6)$$

式中:HA为胡敏酸含量, $g \cdot kg^{-1}$ ;FA为富里酸含量, $g \cdot kg^{-1}$ ;TOC为TOC含量, $g \cdot kg^{-1}$ 。

种子发芽指数(GI)采用有机肥料标准(NYT 525—2021)提供的方法,以黄瓜种子为对象进行测定。

### 1.4 数据处理与统计分析

使用Excel进行数据处理和图表绘制,使用SPSS 20进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆肥的温度变化规律

温度是堆肥腐熟程度重要的判断指标,本研究各

处理的堆肥温度变化规律如图1所示。参考堆肥技术规范(NYT 3442—2019),条垛式堆肥的堆体温度应在55℃以上维持时间不得少于15 d,本研究中T1、T2和T3处理55℃以上的维持时间分别为22、23 d和23 d,3个处理均满足堆肥技术规范。根据堆肥温度可以将堆肥过程划分为升温期、高温期和降温期3个阶段。各处理堆肥温度均在2 d内迅速上升至60℃以上,为升温期;2~23 d为堆肥高温期,期间T1、T2和T3处理的平均温度分别为61.48、61.87℃和62.78℃,表现为T3>T2>T1;23 d后进入降温期,降温期平均温度表现与高温期相反,为T1>T2>T3。添加沼渣提高了堆肥的高温期平均温度,并降低了降温期平均温度。

各处理堆肥的积温情况见表2。堆肥积温与沼渣的添加量成反比,而有效积温比则与其成正比,T1、T2和T3处理堆肥有效积温比分别为59.51%、63.73%和67.98%,具体表现为T3>T2>T1,说明沼渣的添加提高了堆肥稳定性和高温期发酵效率,减少了对降温期发酵的依赖性。而T1处理降温期平均温度相对较高,也印证了其高温期发酵不充分,仍需依靠后期常温发酵来完成物料的充分腐解。

### 2.2 堆肥的干物质降解规律

本研究利用网袋法测定DR,结果如图2所示。干物质的降解呈现明显的阶段性,堆肥后T2处理的

表2 堆肥积温指标

Table 2 Accumulated temperature index of composts

处理 Treatment	最高堆温 Highest temperature/ ℃	有效积温 Available accumulated temperature/ (℃·h)	堆肥积温 Accumulated temperature/ (℃·h)	有效积温比 Available accumulated temperature ratio/%
T1	66.80	25 185.60	42 319.20	59.51
T2	66.67	25 996.80	40 789.60	63.73
T3	66.17	26 352.80	38 763.20	67.98

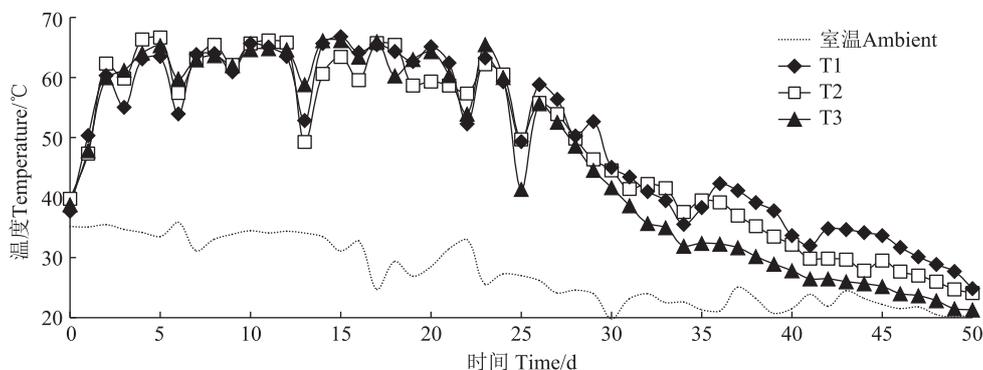


图1 堆体温度的变化

Figure 1 Temperature changes during composting

物料降解相对彻底。堆肥的升温期和高温期是降解的主要阶段,堆肥结束时T1、T2和T3处理的最终DR分别为28.66%、37.16%和35.31%,T2和T3处理DR较T1处理分别显著增加了29.64%和23.19% ( $P < 0.05$ ),T3处理的DR略低于T2处理。同时发现,T1、T2和T3处理高温期(以0~20 d计)对物料降解的贡献分别占72.57%、83.75%和78.97%,说明DR与高温期降解比例呈正相关,降解率越高的处理,在高温期(0~20 d)降解的比例也越高。

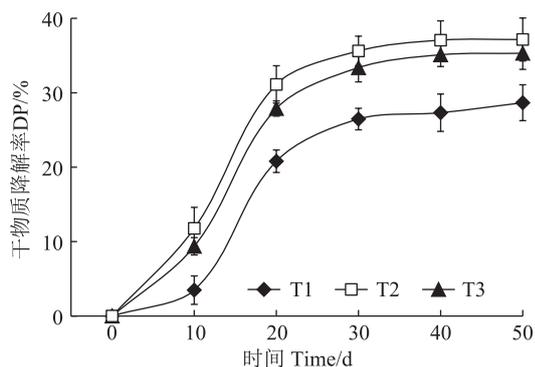


图2 堆肥干物质降解率的变化

Figure 2 Changes of dry matter degradation rate during composting

堆肥过程中微生物代谢会消耗物料的C和N,并以 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 等气体方式挥发。物料TOC和TN的变化规律见图3。结果表明,C、N变化具有明显的阶段性,TOC在0~10 d迅速下降,后期缓慢降低,T1、T2和T3处理最终值分别为415.00、381.67  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和372.82  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3a),结合DR进行计算,T1、T2和T3处理堆肥后CL分别为36.37%、45.78%和44.68%(图3b)。TN含量先下降后上升,第5天为最低值,T1、T2和T3处理最终值分别为23.10、23.89  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和23.23  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3c),而NL分别为24.46%、27.59%和26.05%(图3d)。CL和NL均表现为 $\text{T2} > \text{T3} > \text{T1}$ 。以上说明,堆肥的C、N在高温期迅速损失,降温期后缓慢损失,由于CL高于NL,最终N相对含量升高;沼渣的添加提高了堆体物料的降解率,同时加剧了C、N的损失。

## 2.3 堆肥的腐殖化特征

### 2.3.1 腐殖质组分含量的变化

不同处理中腐殖质主要成分含量的变化规律见图4。堆肥过程中腐殖质组分含量呈现动态变化,具体表现为FA下降,HA逐渐上升。T1、T2和T3处理的FA分别由64.17、47.23  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和40.51  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至51.00、35.66  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和38.12  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,降幅分别为

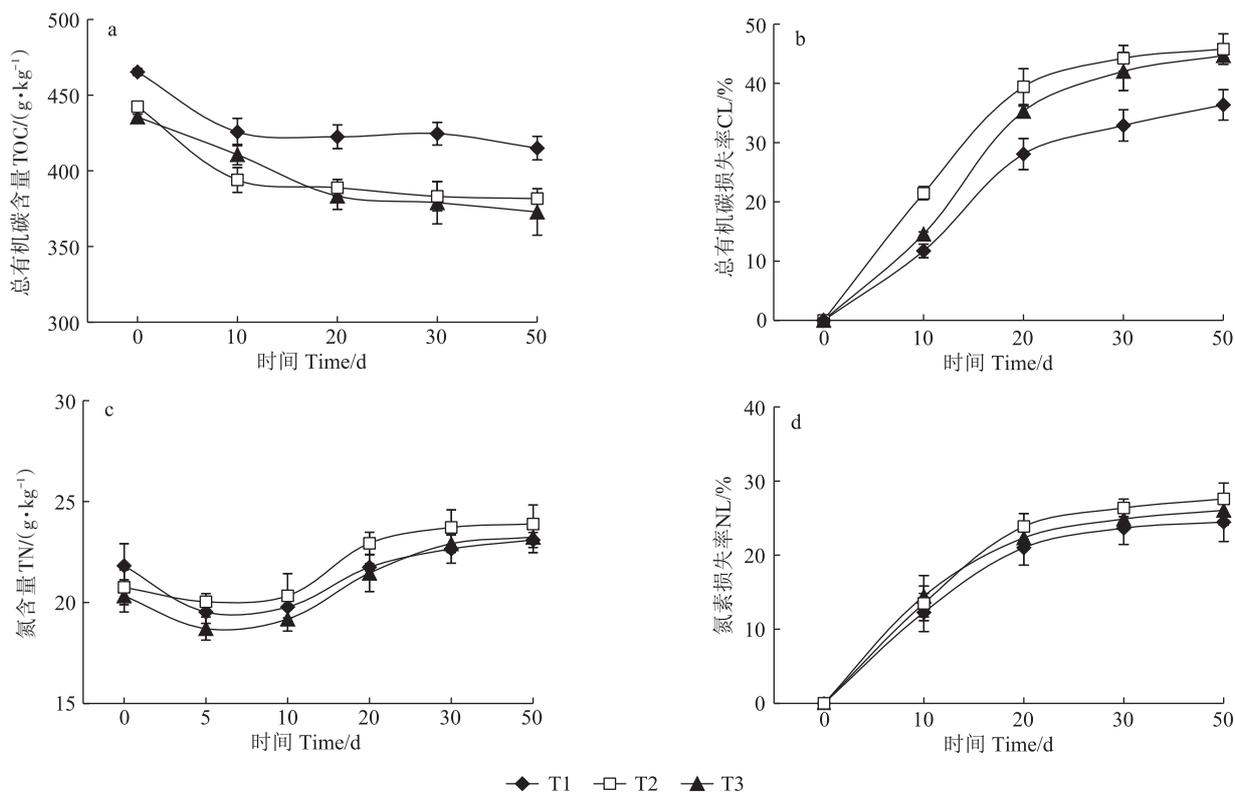


图3 堆肥的总有机碳和总氮变化

Figure 3 Changes of total organic carbon and total nitrogen during composting

20.53%、24.50%和5.89%(图4a)。说明添加适量的沼渣提高了FA的分解,但是高比例的沼渣会抑制FA的分解。T1、T2和T3处理的HA则由15.90、14.70 g·kg<sup>-1</sup>和13.99 g·kg<sup>-1</sup>上升至31.92、29.79 g·kg<sup>-1</sup>和33.58 g·kg<sup>-1</sup>,增幅分别为100.76%、102.73%和140.00%(图4b),可知添加沼渣的比例与HA的合成效率呈正相关。值得注意的是,T3处理FA降幅显著小于其他处理,而HA却增加到初始水平的2.4倍,增幅显著高于其他处理( $P<0.05$ )。

### 2.3.2 腐殖化程度指标的变化

为了更充分地了解堆肥的腐殖化规律,腐殖质各组分变化的相互关系及其与有机碳变化的联系被提

出,并作为堆肥腐殖化程度的评价指标。腐殖化程度指标主要包括DP、HR、HI等。

DP又被称为胡富比,被普遍认为是反映堆肥腐熟程度的重要参数之一。本研究中各处理DP的变化情况见图4d,各处理的DP整体呈现上升趋势,DP增幅表现为T2>T3>T1。各个阶段中,0~20 d各处理的DP均增加,20~30 d增速放缓甚至下降,30~50 d稳定上升。堆肥结束时T1、T2和T3处理的DP分别为0.63、0.84和0.88,堆肥结束时相对于初始的增幅分别达到152.81%、168.51%和155.04%。本研究中添加沼渣的T2和T3处理最终DP均显著高于T1处理( $P<0.05$ )。

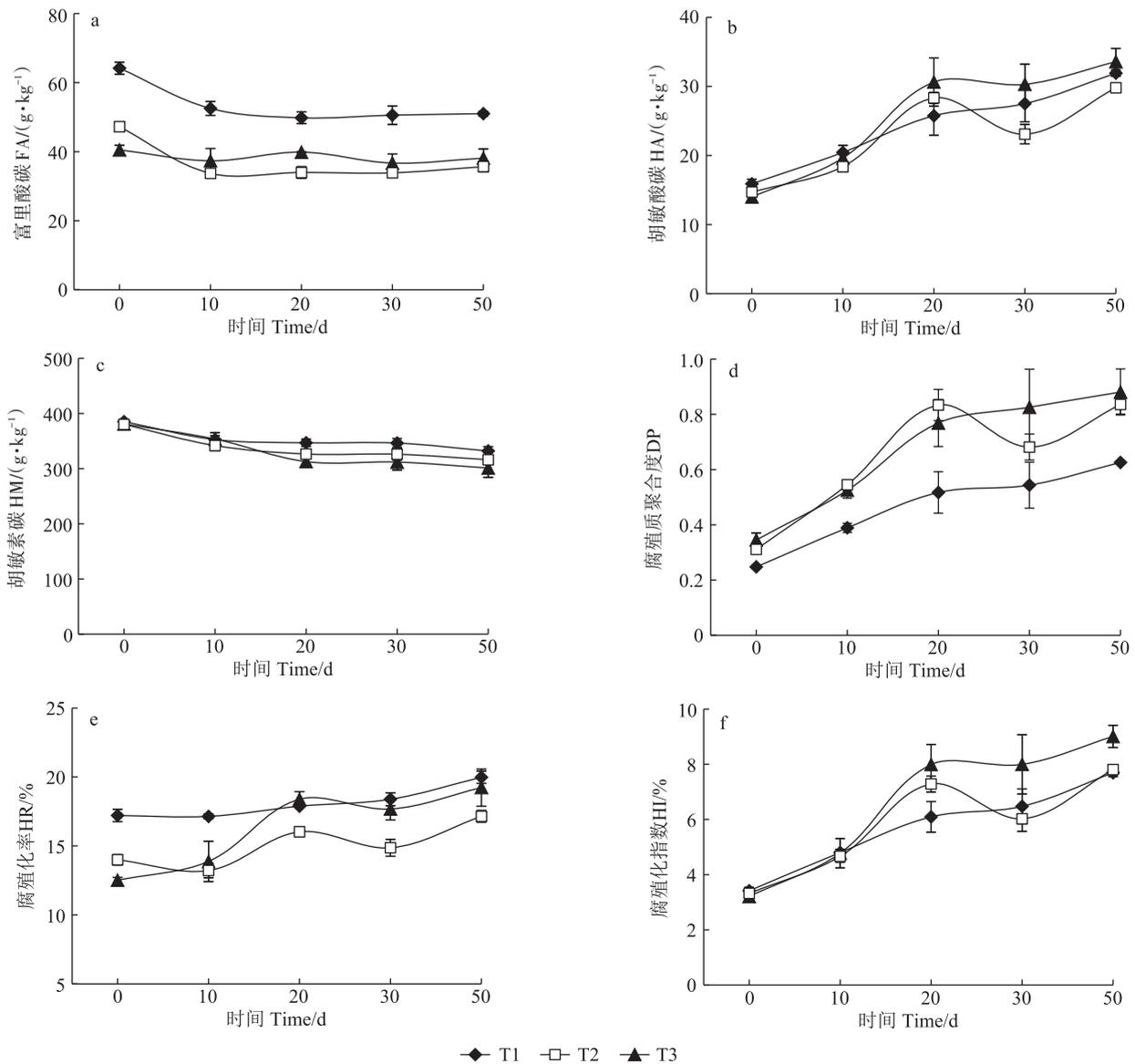


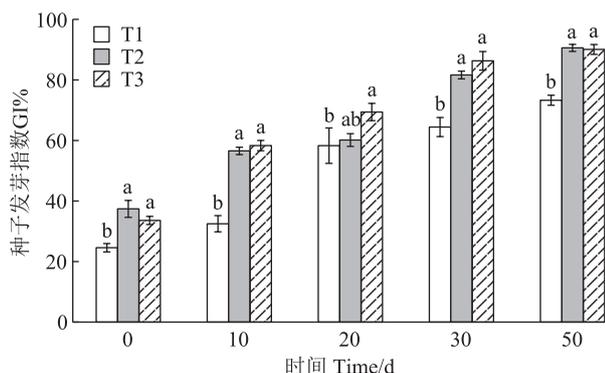
图4 堆肥腐殖质组成和腐殖化过程变化

Figure 4 Variations of humus composition and humification during composting

各处理在堆肥后 HR 和 HI 均上升。T1、T2 和 T3 处理的 HR 分别由堆肥前的 17.21%、14.00% 和 12.51% 增加至 19.98%、17.15% 和 19.23%，增幅分别是 2.77、3.15 个和 6.72 个百分点，HR 增幅在处理间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，其中 T3 处理 HR 增幅显著高于 T1 和 T2 处理 ( $P < 0.05$ ) (图 4e)；堆肥后 T1、T2 和 T3 处理的 HI 值分别是 7.52%、7.87% 和 8.86%，增幅分别为 4.27、4.28 个和 5.80 个百分点 (图 4f)。结果表明，餐厨垃圾堆肥 HR 和 HI 的增幅与添加沼渣的比例呈正相关。

## 2.4 种子发芽指数

GI 是评价堆肥产品腐熟度最直观的方法，一般情况下 GI 大于 50% 可认为堆肥对种子基本无毒性，种子发芽指数大于 70% 符合有机肥标准要求 (NYT 525—2021)。如图 5 所示，随着物料的持续发酵，各处理的 GI 均逐步提高，其中添加了沼渣的 T2 和 T3 处理的 GI 在 30 d 时率先超过 70%。堆肥结束时 T1、T2 和 T3 处理的 GI 分别为 73.30%、90.59% 和 90.08%，其中 T2 和 T3 处理分别显著高于 T1 处理 ( $P < 0.05$ )。



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 5 堆肥的种子发芽指数

Figure 5 Germination index changes during composting

## 3 讨论

餐厨垃圾与沼渣同为有机固体废弃物，受到原料特性的限制，单独堆肥效果均有限，本研究尝试将沼渣添入餐厨垃圾中协同堆肥以改良堆肥效果，发现沼渣可以促进物料有机质的降解，强化堆肥腐殖化作用，并提高了高温期堆肥效率，这与张浩等<sup>[13]</sup>用沼渣和虫粪共同堆肥的研究结果相似。堆肥各处理的温度变化趋势基本一致，但是不同处理的阶段变化特征有差异。添加沼渣的处理高温期平均温度和发酵效

率均高于对照，原因可能有以下方面：一是沼渣的微生物多样性高于餐厨垃圾，添加沼渣相当于引入了较丰富的菌群，提高了堆肥腐殖化过程关键微生物活性<sup>[19]</sup>；其次，沼渣本身均有大量的腐殖质前体以及多种有机质分解酶，为腐殖质的合成提供了原料和催化剂；同时沼渣在协同堆肥中起到了结构调理剂和改良参数的作用<sup>[20]</sup>。因为堆肥的 CL 高于 NL，所以各处理堆肥后 N 的相对含量均有增加，其中加入沼渣的处理效果更好，与温度、GI 的结果一致，也与前人的研究结果相似<sup>[21-22]</sup>。添加沼渣的处理由于高温期发酵效率的提高，增加了 CL 和 NL，说明控制餐厨垃圾和沼渣协同堆肥模式的氮损失仍需进一步研究。添加高比例沼渣的处理 DR 和 GI 略有降低，说明堆肥中沼渣的比例仍不宜过高。本研究发现自堆肥开始时物料的 CL 一直略高于 DR，这可能由于网袋内外的物料变化有差别，如含水率变化和腐解程度不同等，但其变化趋势和处理间的差异性仍可以在一定程度上反映堆肥的降解规律。

腐殖质是堆肥的核心产物，腐殖化程度是评价堆肥腐熟的重要指标<sup>[23-24]</sup>。腐殖化包括有机质矿化和腐殖质合成两个过程，蛋白质、淀粉、脂肪酸和木质纤维素等大分子有机质的碳链在胞外酶的作用下被切断，初步降解为氨基酸、还原糖、有机酸和木质素结构单元等腐殖质前体，腐殖质前体或被微生物矿化分解为  $\text{CO}_2$ ，或在胞内酶的作用下通过特殊途径聚合形成腐殖质<sup>[25]</sup>。腐殖质主要包括 FA 和 HA，其中 HA 是一类分子量大、官能团多的脂肪族和芳香族化合物，包括酚类、醌类、羧酸类和氨基酸等，堆肥中的 HA 含量越高，其有机质稳定性越强；相比之下，FA 分子量小，活性更强<sup>[26]</sup>。堆肥中 FA 和 HA 含量和比例可以反映堆肥发酵状况，两者的比例也是评价堆肥成熟度的常用指标<sup>[27]</sup>。堆肥过程中 FA 与 HA 存在一定的转化关系，且一般来说 FA 向 HA 转化效率较高<sup>[28]</sup>。本研究不同处理的 FA 与 HA 转化程度有差异，其中添加沼渣的处理 HA 合成率较高，这与白玲等<sup>[29]</sup>利用沼渣、餐厨废弃物、牛粪和秸秆混合堆肥的结果相似。可能是由于添加沼渣提高了蛋白质和碳水化合物的降解速率，促进了氨基酸和还原糖等腐殖质前体物质的产生，从而增强了美拉德腐殖化途径和多酚腐殖化途径<sup>[30-31]</sup>。T3 处理中 FA 和 HA 的变化值得关注：相对于其他处理，T3 处理 FA 减量较小，HA 增量却较大，用来表征腐殖化率的指标 HR 的增幅也最高。这或许因为沼渣中提供了丰富的多肽、单糖与氨基酸等腐殖质前

体,沼渣比例较高时,前体物质可以直接用于HA的合成,不再受限于分解餐厨垃圾中的淀粉、蛋白质等物质<sup>[32]</sup>。对餐厨垃圾及其沼渣生物多样性的研究发现,沼渣与其原料(餐厨垃圾)的优势菌群有较强的相似性,而反映微生物多样性指数的Shannon值和Chao1值则更高,分别是餐厨垃圾的2.1倍和7.0倍,这从生物多样性的角度支持了本研究的结论,但是沼渣如何通过强化生物作用影响餐厨垃圾堆肥仍需进一步研究<sup>[19]</sup>。

本研究同时发现,餐厨垃圾堆肥的DP值较低,堆肥结束时各处理的DP范围是0.63~0.88,此时堆肥已经基本腐熟,但是与普遍认为的堆肥腐熟标准(DP达到1.9)有较大差距<sup>[33]</sup>。已经有其他研究发现,餐厨垃圾堆肥后物料的DP由0.58变化至0.65,增幅约为12.1%;猪粪与秸秆静态好氧堆肥的DP增幅为20.3%~149.4%;鸡粪与秸秆堆肥的最终DP为1.5左右,增幅为170%<sup>[34-35]</sup>。可见堆肥腐殖质聚合度的变化很大程度取决于原料种类,建议在以DP评价堆肥腐熟程度时应根据不同的原料特点确定合适的DP范围,同时考虑DP幅度的变化。

#### 4 结论

(1)添加沼渣可以强化餐厨垃圾堆肥腐殖化作用:调节了餐厨垃圾的理化特性,提高了高温期发酵效率,促进了物料降解,提高了胡敏酸的合成效率和腐殖质聚合度,提高了腐殖化指数和腐殖化率的增幅。

(2)餐厨垃圾和沼渣配比为3:1时,堆肥的干物质降解率、TN和种子发芽指数较其他处理更高。

(3)沼渣提高餐厨垃圾堆肥效率的同时也加剧了堆肥过程中的C、N损失,而高温期是C、N损失的主要时期。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2022[EB/OL]. 国家统计局. [2023-01-1]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2022/indexch.htm>. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2022[EB/OL]. National Bureau of Statistics. [2023-01-1]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2022/indexch.htm>.
- [2] 王铭, 全文洁, 尚洪磊, 等. 餐厨垃圾接种酵母菌固态厌氧发酵产乙醇的可行性研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(12): 2830-2835. WANG M, QUAN W J, SHANG H L, et al. Feasibility study of solid anaerobic fermentation of food waste inoculation with yeast[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(12): 2830-2835.
- [3] ZHANG H, LIU G, XUE L, et al. Anaerobic digestion based waste-to-energy technologies can halve the climate impact of China's fast-growing food waste by 2040[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123490.
- [4] ZHANG X, DA C M, LY J H, et al. Food waste composting based on patented compost bins: carbon dioxide and nitrous oxide emissions and the denitrifying community analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 346: 126643.
- [5] WANG S G, ZENG Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 13-19.
- [6] WANG S P, GAO Y. Thermophilic semi-continuous composting of kitchen waste: performance evaluation and microbial community characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127952.
- [7] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252-256. LI G X, LI Y C, LI Y F. Advance on composting of solid waste and utilization of additives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 252-256.
- [8] CHEN Z, LI Y Z, PENG Y Y, et al. Feasibility of sewage sludge and food waste aerobic co-composting: physicochemical properties, microbial community structures, and contradiction between microbial metabolic activity and safety risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 154047.
- [9] JONATHAN S, EDGAR R O, MARIA A A, et al. Optimization of lignocellulolytic bacterial inoculum and substrate mix for lignocellulose degradation and product quality on co-composting of green waste with food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 359: 127452.
- [10] 丁晓艳, 王越, 王宁, 等. 外接堆肥微生物在餐厨废弃物好氧堆肥中的应用[J]. 生物技术通报, 2022, 38(5): 47-55. DING X Y, WANG Y, WANG N, et al. Application of exogenous microbial inoculum in the composting of kitchen waste[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(5): 47-55.
- [11] WANG N Y, REN L H, ZHANG J C, et al. Activities of functional enzymes involved in C, N, and P conversion and their stoichiometry during agricultural waste composting with biochar and biogas residue amendments[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126489.
- [12] ZHONG B, AN X J, AN W J, et al. Effect of bioaugmentation on lignocellulose degradation and antibiotic resistance genes removal during biogas residues composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 340: 125742.
- [13] 张浩, 阮文权, 刘皓, 等. 餐厨浆液沼渣与黑水虻虫粪共堆肥效能研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 1108-1115. ZHANG H, RUAN W Q, LIU H, et al. Effects of co-composting biogas residue of kitchen organic slurry and black soldier fly larval frass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1108-1115.
- [14] XU M Y, YANG M, SUN H S, et al. Role of multistage inoculation on the co-composting of food waste and biogas residue[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 361: 127681.
- [15] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 911-915. CHEN T B, HUANG Q F, GAO D, et al. Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 911-915.
- [16] 班允赫, 李旭, 李新宇, 等. 降解菌系和助腐剂对不同还田方式下

- 水稻秸秆降解特征的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 2982-2988. BAN Y H, LI X, LI X Y, et al. Effects of straw-decomposing microbial consortia and nutrient enhancement on the decomposition characteristics of rice straws in different returning ways[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10): 2982-2988.
- [17] 高文慧, 李波, 叶菁, 等. 生物炭添加对猪粪堆肥氮素形态和损失的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(12): 1440-1446. GAO W H, LI B, YE J, et al. Effects of biochar addition on form and loss of nitrogen in composting pig manure[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(12): 1440-1446.
- [18] 王海候, 程月琴, 金梅娟, 等. 添加生物炭对羊粪堆肥腐殖化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 766-774. WANG H H, CHENG Y Q, JIN M J, et al. Effects of biochar addition on humification of sheep manure compost[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 766-774.
- [19] 潘婧冉, 高苏, 赵国柱, 等. 餐厨垃圾厌氧消化处理主要过程的微生物群落结构分析[J]. 微生物学通报, 2019, 46(11): 2886-2899. PAN J R, GAO S, ZHAO G Z, et al. Microbial community structure in the main processes of anaerobic digestion of restaurant food waste[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(11): 2886-2899.
- [20] FUKUMOTO Y, OSADA T, HANAJIRNA D, et al. Patterns and quantities of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(2): 109-114.
- [21] 宗旺. 渗滤床反应器处理餐厨垃圾条件优化及沼渣肥效评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 69. ZONG W. The optimization of food waste treatment based on leachate bed reactor and fertilizer evaluation of biogas residue[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 69.
- [22] 沈其荣, 王瑞宝, 王岩, 等. 堆肥制作中的生物化学变化特征[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(2): 51-57. SHEN Q R, WANG R B, WANG Y, et al. Biochemical characteristics of composting[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20(2): 51-57.
- [23] CHEN Y, WANG Y Y, XU Z, et al. Enhanced humification of maize straw and canola residue during composting by inoculating *Phanerochaete chrysosporium* in the cooling period[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122075.
- [24] JOSE M L, PAYITHRA S P, IGNACIO A C, et al. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [J]. *Heliyon*, 2020, 6: e05100.
- [25] 张陆, 曹玉博, 王惟帅, 等. 鸡粪添加对蔬菜废弃物堆肥腐殖化过程的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(2): 258-267. ZHANG L, CAO Y B, WANG W S, et al. Effect of chicken manure addition on humification of vegetable waste in composting process[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(2): 258-267.
- [26] GUO X X, LIU H T, WU S B, et al. Humic substances developed during organic waste composting: formation mechanisms, structural properties, and agronomic functions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 501-510.
- [27] ZHANG Z, ZHAO Y, WANG R, et al. Effect of the addition of exogenous precursors on humic substance formation during composting[J]. *Waste Management*, 2018, 79: 462-471.
- [28] DOANE T A, DEVEVRE O C, HORWATH W R. Shortterm soil carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems[J]. *Geoderma*, 2003, 114(3): 319-331.
- [29] 白玲, 李倩, 邓芸, 等. 沼渣与餐厨废弃物牛粪联合堆肥的腐殖化进程研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 331-338. BAI L, LI Q, DENG Y, et al. Humification process of biogas residue combined with food waste and cattle manure co-composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 331-338.
- [30] ZHANG Z H, ZHAO Y, YANG T X, et al. Effects of exogenous protein-like precursors on humification process during lignocellulose-like biomass composting: amino acids as the key linker to promote humification process[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121882.
- [31] ZHOU X L, LI J B, ZHANG J, et al. Bioaugmentation mechanism on humic acid formation during composting of food waste[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154783.
- [32] WU J, ZHAO Y, ZHAO W, et al. Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 226: 191-199.
- [33] 田国宾. 低浓度铬污染土壤与餐厨垃圾混合堆肥研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 47. TIAN G B. Research of aerobic co-composting of low concentration chromium-contaminated soil and food wastes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 47.
- [34] 范嘉妍, 王帅, 姜岩, 等. 稻秸与猪粪静态好氧共堆肥的最佳配比[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 82-87. FAN J Y, WANG S, JIANG Y, et al. The best ratio of rice straw and pig manure inco-composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(3): 82-87.
- [35] 李恕艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 268-274. LI S Y, LI J J, ZHANG B X, et al. Influence of inoculants on content and quality of humus during chicken manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 268-274.

(责任编辑:叶飞)