

冯雯雯,董永华,蔡涵冰,等.微生物菌剂对畜禽粪便与秸秆混合发酵过程参数影响及腐熟度综合评价[J].江苏农业科学,2020,48(6):265-271.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.06.050

微生物菌剂对畜禽粪便与秸秆混合发酵过程参数影响及腐熟度综合评价

冯雯雯^{1,3},董永华²,蔡涵冰^{1,3},孙俊松³,张保国³,马中良¹

(1. 上海大学生命科学学院,上海 200444;2. 上海市农产品质量安全中心,上海 200335;3. 中国科学院上海高等研究院,上海 201210)

摘要:为了研究复合微生物菌剂添加对猪粪和秸秆混合发酵制备生物肥料过程中相关参数和腐熟度的影响,以猪粪和秸秆为原料,分别设置不添加菌剂的对照组(CK)和添加菌剂的处理组(GT),对比分析固态发酵过程中的 pH 值、电导率(EC)、总有机碳(TOC)含量、总氮(TN)含量、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量、C/N、种子发芽指数(GI)等指标,然后运用灰色关联分析法综合评价 2 组处理在不同时间段的物料腐熟程度。结果表明,对照组和处理组在固态发酵过程中 pH 值、电导率、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量、C/N、种子发芽指数(GI)的变化趋势基本一致,但添加微生物菌剂的 pH 值在后期变化相对更稳定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量和 C/N 也更低。灰色关联分析的结果表明,添加微生物菌剂后在固态发酵在第 11 天物料已经达到一级腐熟,而对照的仅为三级腐熟,说明微生物菌剂的添加能缩短腐熟时间,并且使物料达到更好的腐熟程度,但物料进一步的发酵会使物料的肥力下降。

关键词:微生物菌剂;固态发酵;畜禽粪便;秸秆;电导率;铵态氮;种子发芽指数;灰色关联分析法;腐熟度

中图分类号:X713;S188⁺.4;S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)06-0265-07

随着我国农业生产规模的不断扩大和畜禽养殖集约化程度的提高,秸秆和畜禽粪便等农业有机固体废物废弃物也大量产生。据统计,我国共产生约 7 亿 t/年作物秸秆^[1-2],其主要有机成分为纤维素、半纤维素和木质素类物质^[3-4],作物秸秆作为土壤改良剂直接还田时,由于缺乏腐熟和稳定的有机质,容易减缓有机质的矿化作用以及土壤的缺氧环境。这不仅造成了资源的浪费,还会加剧环境的污染。此外,我国产生畜禽粪便 38 亿 t/年^[5-6],预计到 2020 年的排放量将达到 41 亿 t^[7]。因为畜禽粪便含有丰富的有机质和氮、磷、钾等元素^[8],所以畜禽粪便在农业活动过程中一直都作为一种有价值的肥料,但是由于养殖业和种植业的规模化、集约化的发展导致了养殖种植业的分离,从而使粪便的运输成本增加^[9],其中 40% 的粪便没有得到有效的处理和利用,未经发酵直接排入水体,由于粪便中的有机质和氮、磷等元

素使得水体富营养化^[10],最终导致水体生物的死亡,同时威胁人类生活。所以,农业有机固体废物废弃物的减量化处理与资源化利用已经成为目前研究的重点和热点。

目前实现农业废弃物减量化、无害化、资源化的方式之一是进行堆肥处理^[11-17]。堆肥处理是一种将农业废弃物资源化、无害化的手段,通过微生物降解农业废弃物中残留的大量有机物,并且在堆肥过程中产生并维持一段时间的高温来杀灭农业废弃物中的病原菌、虫卵,以及降解有毒、有害等物质,使堆肥结束后的物料成为可以直接还田的有机肥,该有机肥的使用有利于减少农田无机化肥用量、促进农作物生长、提高土壤肥力、改善土壤结构^[18-24]。

研究表明,由于农业废弃物中含有大量结构复杂、难降解的木纤维素类物质^[25],如果不添加外源菌剂处理单独直接发酵,物料有机质降解不完全,而且发酵周期一般会比较长。Gou 等在寒冷的气候条件下通过添加外源菌剂加快了固态发酵的升温阶段并且促进了物料腐熟^[26];Jiang 等在猪粪固态发酵过程中添加氮转化菌剂促进了物料中有机质的降解,同时有效减少氮损失和促进腐熟^[27];Zhao 等在固态发酵中接种外源放线菌增强了纤维素的

收稿日期:2019-02-19

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0800205)。

作者简介:冯雯雯(1993—),女,贵州遵义人,硕士,主要从事农业固体废物资源化利用研究。E-mail:fengwenwen@sari.ac.cn。

通信作者:张保国,博士,副研究员,主要从事为微生物代谢与调控研究,E-mail:zhangbg@sari.ac.cn;马中良,博士,副教授,主要从事微生物资源与微生物活性物质研究,E-mail:zhma@shu.edu.cn。

降解,加速了堆肥过程^[28]。所以,有效外源菌剂的添加有利于缩短固态发酵时间并促进物料腐熟。而发酵后的物料是否达到了处理和利用的目的主要是通过腐熟度进行评价,因为未完全腐熟的物料直接用于作物种植,会引起种植环境中微生物的活动,从而导致土壤环境缺氧,另外还会产生大量的中间代谢产物(如小分子有机酸、NH₃ 等有害成分),毒害植物的根系,影响作物生长^[29]。然而固态发酵原料的高度多样性、异质性和各种固态发酵系统工艺的不同,给物料腐熟评估体系带来了困难^[30-31],为避免仅片面地从某一指标或某一方面评价物料腐熟程度^[32],模糊综合评价法、灰色聚类法、灰色关联分析等数学方法综合考虑了评价指标,使得评价结果更具有综合性、科学性、可操作性,成为目前评价物料腐熟度的优选方法^[33],薛文博等利用灰色关联分析法综合评价了陕西中秦城市资源开发有限公司的堆肥样品的腐熟度^[29];任春晓等比较模糊综合评价法、灰色关联分析法、属性识别法综合评判不同工艺物料末期的腐熟度,结果显示,灰色关联分析法更加符合实际情况,是物料腐熟评价的一种较优的方法^[34];弓凤莲等也应用灰色关联度评价了牛粪、鸡粪和花生壳等不同物料堆的腐熟度^[32]。但是,先前的这些研究都是评价终期物料的腐熟度,对于灰色关联分析应用到更多类型的物料固态发酵的研究以及固态发酵不同时期物料的腐熟度评价鲜有报道。

本研究以猪粪、秸秆为原料,设置不添加微生物菌剂的对照组(CK)和添加微生物菌剂的处理组(GT)在 5 L 固态发酵罐中进行混合发酵,通过检测 pH 值、电导率(EC)、总有机碳(TOC)含量、总氮(TN)含量、铵态氮(NH₄⁺ - N)含量、C/N、GI(种子发芽指数)等参数来反映猪粪秸秆混合固态发酵过程中的物质变化,并通过部分参数建立灰色关联分析方法来评估外源菌剂对猪粪秸秆混合固态发酵各时间段物料的腐熟程度的影响,希望本研究利用小型固体发酵设备的试验能为大型堆肥厂堆肥和更多的各种类型的废弃物固态发酵过程和工艺提供一些理论依据。

1 材料与方法

1.1 固态发酵原料和固态发酵试验

原料是来自上海崇明岛某养猪场的猪粪和来自江苏某农场的玉米秸秆(新鲜的)和稻草秸秆(干

燥、发黄、无霉变),切成 2~3 cm 的秸秆段,堆料的基本性质如表 1 所示。

表 1 原料的基本性质

物料	含水量 (%)	TOC 含量 (g/kg)	TN 含量 (mg/kg)
玉米秸秆	68.43	364.10	11 767.68
猪粪	67.22	406.40	27 350.51
稻草	15.25	360.50	10 240.20

采用 5SS 不锈钢固体发酵罐(产品型号为 BLBIO-5SS;产品编号为 112386-2387;上海百仑生物科技有限公司),容积为 5 L,有效体积 75%,能够自动搅拌、控制湿度。玉米秸秆、猪粪和稻草按干质量比约为 15:2:5,总质量约为 7.50 kg,以添加 0.2% 微生物菌剂(腐熟剂、粉末由细菌、放线菌、酵母菌组成,有效活菌数为 5×10⁸~9×10⁸ CFU/g)为处理组(GT),以不加微生物菌剂为空白对照组(CK),初始 C/N 均为 31.54,初始含水量控制在 55%~70%,pH 值均为 7.36。由于堆体小,容易散热,因此采用水浴加热对堆体进行保温,具体温度程序设计^[35-36]:初始温度 30℃;1 d,35℃;2 d,40℃;3 d,45℃;4 d,47℃;5 d,50℃;6 d,55℃;7~9 d,60℃;10 d,58℃;11~12 d,55℃;13 d,50℃;14~18 d,45℃;19 天,35℃;20~23 d,33℃;每 2 d 翻 1 次,取样时间为 0、4、8、11、15、23 d。

1.2 物理化学参数检测方法

将 100 mg/mL 提取液用于检测堆料的 pH 值、电导率(EC)^[8,37-38];通过凯氏定氮仪检测固态发酵堆料的总氮(TN)含量^[39];根据重铬酸钾氧化法-分光光度法测定固态发酵堆料的总有机碳(TOC)含量^[40-41];参照已有研究的文献方法检测物料的铵态氮(NH₄⁺ - N)含量^[42]。

1.3 种子发芽指数(GI)检测方法

GI 作为反映腐熟度最常用的指标,将质量浓度为 100 mg/L(DW)新鲜样品置于 30℃、180 r/min 水平振荡 1 h,4 000 r/min 离心 30 min,取上清液 4 mL 于垫有 watmanR 滤纸的培养皿中,然后均匀放置 20 粒白菜种子于 25℃的培养箱暗培养 48 h,其间注意保持培养箱中的湿度,以免培养皿干燥,影响种子发芽指数,以纯水为对照组,48 h 后量根长数和种子萌发数,并根据如下公式计算种子发芽指数^[24,43]:

$$GI = \frac{\text{试验组种子发芽率} \times \text{试验组根长}}{\text{对照组种子发芽率} \times \text{对照组根长}} \times 100\%$$

1.4 灰色关联分析法

灰色关联分析法是用来研究不确定性系统的一种方法,是根据系统各因素间数据列的发展态势和相异程度判断因素的关联和接近程度。对某一个系统作关联分析之前,必须知道系统中各指标或者因素的实际映射量,一般通过打分和试验就可以

表 2 堆料腐熟度评价标准

腐熟等级	表观得分	C/N 降解率 (%)	NH ₄ ⁺ - N 降解率 (%)	GI (%)	EC 变化率 (%)
一级	9	60	30	100	40
二级	7	45	35	90	50
三级	5	21	45	70	60
四级	2	12	70	60	70

将腐熟分级标准和 2 种处理的样品作为一个灰色系统,分级标准和 2 个处理下发酵后 4、8、11、15、23 d 的样品看作为灰色系统的因素,通过计算灰色系统中因素之间的关联度,即能得到发酵后 4、8、11、15、23 d 样品与腐熟分级标准的关联程度,关联度越高,越接近该腐熟等级。设待评价样品数列为 $\{X_0(k)\} = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), X_0(4), X_0(5)\}$; 被比较数列为 $\{X_i(k)\} = \{X_i(1), X_i(2), X_i(3), X_i(4), X_i(5)\}$ 。式中: i 为腐熟度分级标准,取 1、2、3、4; k 为评价指标,取 1、2、3、4、5。关联系数公式:

$$\varepsilon_{0i} = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (1)$$

式中: ρ 为分辨系数(0~1),一般取 0.5。

待评价样品数列 $\{X_0(k)\}$ 与被比较数列 $\{X_i(k)\}$ 之间的关联度计算:

$$r_{0i} = \frac{1}{\sigma} \sum_{k=1}^6 \varepsilon_{0i}(k) \quad (2)$$

根据计算出的关联度(r_{0i})可以评估待评价样品和各分级腐熟度之间的接近程度,关联度越大,说明越接近该级别腐熟度,并且根据所有关联度中的最大值,来判定该样品所属腐熟级别。

1.5 数据统计分析

使用 Origin、Excel 等软件统计、分析 pH 值、EC、NH₄⁺ - N 含量、TN 含量、TOC 含量、C/N 等数据并作图。

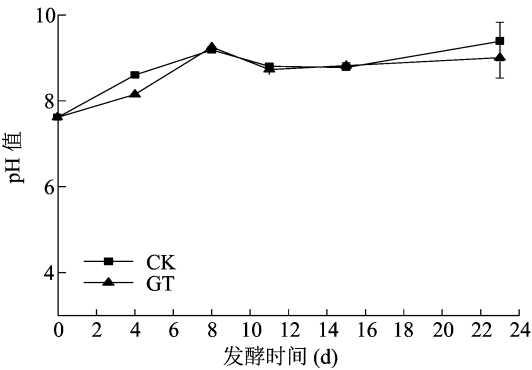
2 结果与分析

2.1 理化参数变化

2.1.1 pH 值的变化 pH 值是影响微生物活性的主要因素之一,2 个不同处理的 pH 值的变化如图 1

知道各指标或因素的映射量^[32]。本研究参照国内外堆料腐熟评价方法,制定出 1 个含 5 个评价指标和 4 个腐熟等级的腐熟评价标准(表 2)^[32,44-46],结合灰色关联分析法来综合性判定不同固态发酵处理不同时间段物料的腐熟程度。

所示,都是整体呈先上升后下降的趋势,不添加微生物菌剂的对照组(CK)和添加微生物菌剂的处理组(GT)的 pH 值在发酵后 10 d 均从 7.62 分别达到 8.80 和 8.73,随后呈缓慢下降变化,但是 GT 的 pH 值在末期相对比较稳定,而 CK 的 pH 值在末期小幅增加至 9.38。初期 pH 值上升可能是由于固体发酵过程中产生 NH₄⁺ - N 所致,后期随着发酵过程中有机物的降解产生小分子有机酸致 pH 值下降,发酵罐后期 pH 值稍有上升也有可能是由于发酵过程中产生的小分子有机酸等物质的降解所致^[47]。



CK—固态发酵对照组; GT—固态发酵处理组。下同
图1 固态发酵过程中 pH 值的变化情况

2.1.2 电导率(EC)的变化 电导率反映了固体发酵过程中堆料的盐度,是评价堆肥是否对植物产生毒害作用的重要参数,在一定程度上反映堆肥对植物的毒性以及对植物的生长抑制作用^[48],电导率过大,堆料作为有机肥施用可能对于土壤微生物活性产生不利影响^[49],最终抑制作物生长。如图 2 所示,不添加微生物菌剂的对照组(CK)和添加微生物菌剂的处理组(GT)的电导率在发酵过程中变化基

本一致,均呈现先减少后增加的趋势。初期电导率的下降可能是因为微生物生长消耗堆料中的可溶性盐^[50],发酵中期电导率上升可能是因为微生物活动过程中降解有机质产生更多的可溶性盐^[48]。其中,CK、GT 的初始电导率均为 1.95 mS/cm,在发酵后 11 d 时电导率分别为 1.48、1.86 mS/cm,固态发酵的末期(23 d)电导率分别达到 1.31、1.58 mS/cm,并且电导率均小于 4 mS/cm,满足腐熟要求^[51]。

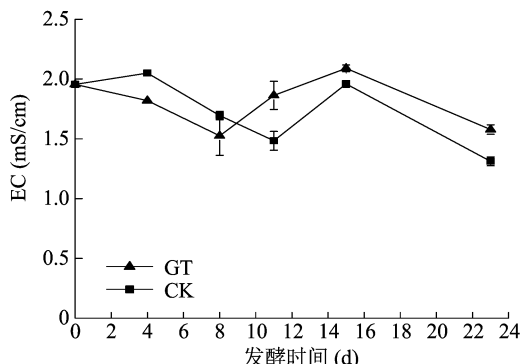


图2 固态发酵过程中电导率的变化情况

2.1.3 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 含量的变化 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 也是腐熟度指标之一^[51-52]。如图 3 所示,不添加微生物菌剂的对照组 (CK) 和添加微生物菌剂的处理组 (GT) 的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 含量整体上都是呈逐渐减少的变化。由于初期温度开始升高,高温好养微生物繁殖消耗部分的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 用于微生物生长,所以使得 2 种不同处理固态发酵过程中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在 0 ~ 4 d 呈下降趋势,而在 4 ~ 8 d 由于高温氨化细菌的逐渐繁殖,堆料中有机物的氨化作用增强转化成铵态氮,所以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈递增趋势^[53]。随后,由于高温导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化成 NH_3 释放到空气中,以及后期温度下降过程中硝化微生物通过硝化作用将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[30],所以 2 种处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量逐渐降低。其中,GT 的铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 明显低于 CK,可能因为在固态发酵过程中添加菌剂后硝化作用增强,从而使更多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[52]。最终 CK、GT 固态发酵过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别为 0.33、0.13 mg/g。Bernal 等则认为,腐熟堆肥的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量应小于 0.4 mg/g^[18]。由此可以看出,CK 和 GT 2 种处理都达到腐熟,并且从图 3 中显示 GT 在发酵后 11 d 左右低于 0.4 mg/g,而 CK 在发酵后 13 d 左右才低于 0.4 mg/g,说明 GT 更快达到此腐熟标准。

2.1.4 C/N 的变化 C/N 是堆料腐熟度评价比较经典的化学指标^[53-54],由图 4 可知,不添加微生物

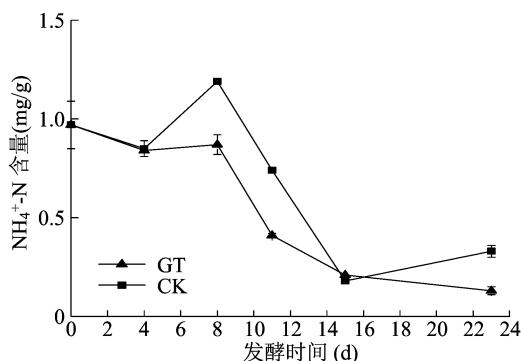


图3 固态发酵过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化情况

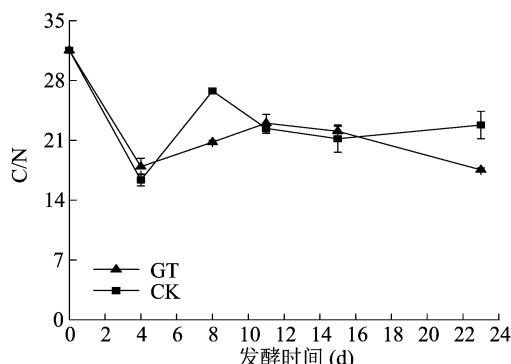


图4 固态发酵过程中 C/N 的变化情况

菌剂的对照组 (CK) 和添加微生物菌剂的处理组 (GT) 的 C/N 的变化趋势相对比较一致,都是初期开始迅速降低、随后增加、最后缓慢变化。初期 C/N 的减少是由于微生物开始大量利用有机碳,并且利用有机碳的速率大于有机氮^[55];随后 C/N 增加,是因为微生物利用有机氮的速率增加,其中在发酵后 8 d,CK 和因为 GT 的 C/N 分别增加至 26.78 和 20.8,可能是因为 GT 的微生物活性大于 CK;其中,CK 和 GT 的 C/N 在发酵后 11 d 分别为 23.02 和 22.41,到 23 d 时分别达到 22.8 和 17.55,相对于初期的 31.54,C/N 明显降低,并且 C/N 均小于 25,满足堆料腐熟要求^[47]。

2.2 种子发芽指数 (GI)

GI 可有效直接反映堆料产品的植物毒性^[56-57]。在固态发酵过程中的种子发芽指数变化如图 5 所示,2 组处理的种子发芽指数均呈现先增加后减少的趋势,具体变化为不添加微生物菌剂的对照组 (CK) 和添加微生物菌剂的处理 (GT) 的种子发芽指数在发酵后 4 d 分别为 88.76% 和 102.96%,在发酵后 8 d 种子发芽指数分别为 77.51% 和 109.76%,在发酵后 11 d 分别达到最大值,为 134.91% 和 144.62%,在发酵后 15 d 分别为 84.03% 和 99.41%,在发酵后 23 d 分别降低至 84.8% 和 69.67%。其中 CK 的种子发芽指数

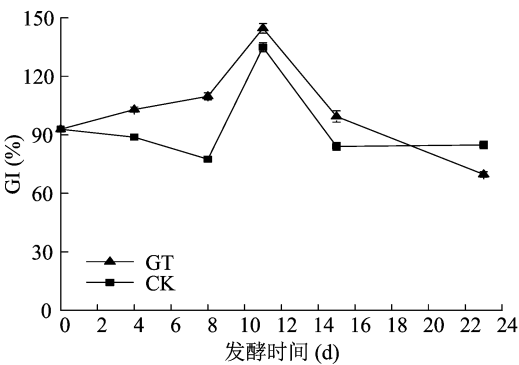


图5 固态发酵过程中 GI 的变化

在前 15 d 均低于 GT,并且 2 种处理的种子发芽指数在发酵后 11 d 以后均下降,表明物料进一步的发酵会使堆肥促进作物生长能力下降^[58]。

2.3 灰色关联分析结果

通过试验测定评判指标,获得各处理在各时间段物料样品的 5 种评价指标结果(表 3)和关联度

表 3 各处理各时间段的固态发酵罐物料判定指标

发酵时间 (d)	表观得分	CK 碳氮比 降解率(%)	CK 铵态氮 降解率(%)	CK 种子 发芽指数(%)	CK 电导率 变化率(%)	GT 碳氮比 降解率(%)	GT 氨态氮 降解率(%)	GT 种子 发芽指数(%)	GT 电导率 变化率(%)
4	2	48.09	88.50	88.76	104.86	43.14	79.15	102.96	93.09
8	2	15.11	123.06	77.51	86.70	34.04	82.34	109.76	78.00
11	5	28.95	76.41	134.91	75.91	27.00	38.21	144.62	95.31
15	5	32.78	18.94	84.03	100.26	30.02	19.71	99.41	106.91
23	7	27.71	33.77	84.80	67.06	44.37	12.35	69.67	80.69

表 4 不同时期的不添加微生物菌剂的对照组(CK)的样品关联度

各时间段的样品	4 d	8 d	11 d	15 d	23 d
一级	0.568 8	0.512 5	0.707 7	0.642 7	0.726 1
二级	0.624 2	0.551 2	0.750 8	0.665 9	0.826 3
三级	0.713 0	0.629 2	0.756 7	0.702 0	0.789 9
四级	0.809 8	0.824 1	0.673 6	0.617 2	0.658 6

表 5 不同时期的添加微生物菌剂的处理组(GT)的样品关联度

各时间段的样品	4 d	8 d	11 d	15 d	23 d
一级	0.567 8	0.600 8	0.680 5	0.632 9	0.651 2
二级	0.601 8	0.653 4	0.658 6	0.637 8	0.664 6
三级	0.800 2	0.814 1	0.668 1	0.681 1	0.598 7
四级	0.757 9	0.728 2	0.643 4	0.628 6	0.627 2

3 结论

固体发酵罐模拟好氧固态发酵过程中,不添加微生物菌剂的对照组(CK)、添加微生物菌剂的处理组(GT)的种子发芽指数在发酵后 11 d 分别达到

分析结果(表 4、表 5)。由表 4、表 5 可知,不添加微生物菌剂的对照组(CK)在发酵后 4、8 d 的物料与四级腐熟的最大关联度分别为 0.809 8、0.824 1,为四级腐熟;发酵后 11、15 d 的物料与三级腐熟的最大关联度为 0.756 7、0.702 0,达到三级腐熟;发酵后 23 d 的物料与二级腐熟的最大关联度分别为 0.826 3,达到二级腐熟。而添加微生物菌剂处理组(GT)在发酵后 4、8 d 的物料与三级腐熟的最大关联度分别为 0.800 2、0.814 1,物料达三级腐熟;发酵后 11 d 的物料与一级腐熟的最大关联度为 0.680 5,达一级腐熟;发酵后 15 d 的物料与三级腐熟的最大关联度为 0.681 1,降到三级腐熟;发酵后 23 d 时,根据最大关联度显示物料达到二级腐熟,但是均未达到发酵后 11 d 的一级腐熟。综上所述数据显示,GT 相较于 CK 更快达到腐熟并且腐熟程度相对更好。

134.91%、144.62%,C/N 比在发酵后 11 d 分别为 21.82、24.00,EC 分别为 1.48、1.86 mS/cm (均 \leq 4 mS/cm^[51]),其中 C/N \leq 25^[47],GI>80%^[24],GI、C/N、EC 在发酵后 11 d 均达到腐熟标准,通过灰色关联分析可知,CK 在发酵后 11 d 达到

三级腐熟,而 GT 达到一级腐熟,说明 GT 组的物料达到腐熟的速度更快且腐熟程度更好,如果进一步发酵会使堆料肥力下降。

参考文献:

- [1] 曹志宏,黄艳丽,郝晋珉. 中国作物秸秆资源利用潜力的多适宜性综合评价[J]. 环境科学研究,2018,31(1):179-186
- [2] Fu P, Yi W, Li Z, et al. Comparative study on fast pyrolysis of agricultural straw residues based on heat carrier circulation heating[J]. Bioresource Technology,2019,271:136-142.
- [3] 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1852-1859.
- [4] 张燕. 中国秸秆资源“5F”利用方式的效益对比探析[J]. 中国农学通报,2009,25(23):45-51.
- [5] Li F H, Fan H L, Wang X C, et al. Influences of phosphorus on ash fusion characteristics of coal and its regulation mechanism[J]. Fuel, 2019,239:1338-1350.
- [6] 卞爱琴,远野,张璐璐,等. 热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件[J]. 环境科学,2019(02):1-11.
- [7] Yang T X, Li Y J, Gao J X, et al. Performance of dry anaerobic technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China[J]. Energy,2015,93(2):2497-2502.
- [8] Şevik F, Tosun İ, Ekinci K. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks[J]. Waste Management,2018,80:450-456.
- [9] Neshat S A, Mohammadi M, Najafpour G D, et al. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,79:308-322.
- [10] Bluemling B, Wang F. An institutional approach to manure recycling: conduit brokerage in Sichuan Province, China[J]. Resources Conservation and Recycling,2018,139:396-406.
- [11] Larney F J, Olson A F, Carcamo A A, et al. Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer[J]. Bioresource Technology,2000,75(2):139-148.
- [12] Larney F J, Hao X. A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada[J]. Bioresource Technology,2007,98(17):3221-3227.
- [13] Zhou C, Liu Z, Huang Z L, et al. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: addition of different inocula at three stages of composting[J]. Waste Management,2015,40:38-43.
- [14] Qian X, Shen G, Wang Z, et al. Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. Waste Management,2014,34(2):530-535.
- [15] Wang C, Lu H, Dong D, et al. Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N_2O emission and denitrifying community[J]. Environmental Science & Technology,2013,47(13):7341-7349.
- [16] Zhang L, Zeng G, Zhang J, et al. Response of denitrifying genes coding for nitrite (nirK or nirS) and nitrous oxide (nosZ) reductases to different physico-chemical parameters during agricultural waste composting[J]. Applied Microbiology and Biotechnology,2015,99(9):4059-4070.
- [17] Zhang L, Jia Y, Zhang X, et al. Wheat straw: an inefficient substrate for rapid natural lignocellulosic composting[J]. Bioresource Technology,2016,209:402-406.
- [18] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review[J]. Bioresource Technology,2009,100(22):5444-5453.
- [19] Cui H Y, Zhao Y, Chen Y N, et al. Assessment of phytotoxicity grade during composting based on EEM/PARAFAC combined with projection pursuit regression[J]. Journal of Hazardous Materials,2017,326:10-17.
- [20] Godlewska P, Schmidt H P, Ok Y S, et al. Biochar for composting improvement and contaminants reduction: a review[J]. Bioresource Technology,2017,246:193-202.
- [21] Wang Y J, Huang G Q, Zhang A Q, et al. Estimating thermal balance during composting of swine manure and wheat straw: a simulation method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2014,75:362-367.
- [22] González M, Gomez E, Comese R, et al. Influence of organic amendments on soil quality potential indicators in an urban horticultural system[J]. Bioresource Technology,2010,101(22):8897-8901.
- [23] Alavi N, Daneshpajou M, Shirmardi M, et al. Investigating the efficiency of co-composting and vermicomposting of vinasse with the mixture of cow manure wastes, bagasse, and natural zeolite[J]. Waste Management,2017,69:117-126.
- [24] Zhao X, Wei Y, Fan 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.
- [25] 郭香麟,左剑恶,史绪川,等. 餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比[J]. 环境科学,2017,38(7):3070-3077.
- [26] Gou C, Wang Y, Zhang X, et al. Inoculation with a psychrotrophic-thermophilic complex microbial agent accelerates onset and promotes maturity of dairy manure-rice straw composting under cold climate conditions[J]. Bioresource Technology,2017,243:339-346.
- [27] Jiang J, Liu X, Huang Y, et al. Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting[J]. Waste Management,2015,39:78-85.
- [28] Zhao Y, Lu Q, Wei Y, et al. Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis[J]. Bioresource Technology,2016,219:196-203.
- [29] 薛文博,张增强,易爱华,等. 灰色关联分析法在堆肥腐熟度评价中的应用[J]. 环境卫生工程,2006(5):7-8,11.

- [30] Gao M, Liang F, Yu A, et al. Evaluation of stability and maturity during forced – aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(5): 614 – 619.
- [31] Li X, Zhang R, Pang Y. Characteristics of dairy manure composting with rice straw[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 359 – 367.
- [32] 弓凤莲, 汪强, 李培培. 应用灰色关联度评价不同物料堆肥腐熟度的研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(29): 10054 – 10056.
- [33] 孟国欣, 查同刚, 巩潇, 等. 污泥添加园林废弃物堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1538 – 1546.
- [34] 任春晓, 席北斗, 赵越, 等. 有机生活垃圾不同微生物接种工艺堆肥腐熟度评价[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(2): 226 – 231.
- [35] 颜瑾, 李燕, 熊仁, 等. 农村不同类型有机固体废弃物混合堆肥配比优化[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(7): 2106 – 2113.
- [36] 潘寻, 强志民, 袁伟伟. 高温堆肥对猪粪中多类抗生素的去除效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(1): 64 – 69.
- [37] Şevik F, Tosun İ, Ekinçi K. Composting of olive processing wastes and tomato stalks together with sewage sludge or dairy manure[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13(5): 1207 – 1218.
- [38] Zhang R, Gu J, Wang X, et al. Contributions of the microbial community and environmental variables to antibiotic resistance genes during co – composting with swine manure and cotton stalks[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 358: 82 – 91.
- [39] Zhang L, Zeng G, Dong H, et al. The impact of Silver nanoparticles on the co – composting of sewage sludge and agricultural waste: evolutions of organic matter and nitrogen[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 230: 132 – 139.
- [40] Mi W H, Wu L H, Brookes P C, et al. Changes in soil organic carbon fractions under integrated management systems in a low – productivity paddy soil given different organic amendments and chemical fertilizers[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 163: 64 – 70.
- [41] Xu J, Xu X, Liu Y, et al. Effect of microbiological inoculants DN – 1 on lignocellulose degradation during co – composting of cattle manure with rice straw monitored by FTIR and SEM[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2016, 35(2): 345 – 351.
- [42] Gong X Q, Cai L L, Li S Y, et al. Bamboo biochar amendment improves the growth and reproduction of *Eisenia fetida* and the quality of green waste vermicompost[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 156: 197 – 204.
- [43] Jeong K H, Kim J K, Ravindran B, et al. Evaluation of pilot – scale in – vessel composting for Hanwoo manure management[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 201 – 206.
- [44] 弓凤莲, 杨义, 于淑婷, 等. 市政污泥堆肥过程参数变化及腐熟度综合评价[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 128 – 131.
- [45] 张永涛, 张增强, 孙西宁. 模糊数学法在堆肥腐熟度评价中的应用[J]. *环境卫生工程*, 2009, 17(4): 45 – 48.
- [46] 李春萍, 李国学, 李玉春, 等. 北京南宫静态堆肥隧道仓不同区间的垃圾堆肥腐熟度模糊评价[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 201 – 206.
- [47] Liu N, Zhou J, Han L, et al. Characterization of lignocellulosic compositions' degradation during chicken manure composting with added biochar by phospholipid fatty acid (PLFA) and correlation analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1003 – 1011.
- [48] 王砚, 李念念, 朱端卫, 等. 水稻秸秆预处理对猪粪高温堆肥过程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 2021 – 2028.
- [49] Arias O, Vina S, Uzal M, et al. Composting of pig manure and forest green waste amended with industrial sludge[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 586: 1228 – 1236.
- [50] 刘超, 徐谔, 王若斐, 等. 资源化利用冲施猪粪水高温堆肥研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3826 – 3835.
- [51] Hou N, Wen L, Cao H, et al. Role of psychrotrophic bacteria in organic domestic waste composting in cold regions of China[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 236: 20 – 28.
- [52] 刘超, 王若斐, 操一凡, 等. 不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(3): 662 – 668.
- [53] 鲁耀雄, 高鹏, 崔新卫, 等. 中药渣堆肥过程中氮素转化及相关微生物菌群变化的研究[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(3): 527 – 534.
- [54] 曹云, 黄红英, 钱玉婷, 等. 超高温预处理装置及其促进鸡粪稻秸好氧堆肥腐熟效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 243 – 250.
- [55] 何秀红, 罗学刚, 贾文甫, 等. 高温快速堆肥处理屠宰废弃物效果研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(1): 171 – 177, 182.
- [56] Ren S, Guo X, Lu A, et al. Effects of co – composting of lincomycin mycelia dregs with furfural slag on lincomycin degradation, maturity and microbial communities[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 155 – 162.
- [57] Alburquerque J A, González J, García D, et al. Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by – product of extracting olive oil by the two – phase centrifugation system[J]. *Chemosphere*, 2006, 64(3): 470 – 477.
- [58] 吴红萍, 陈喜蓉, 金映虹. 利用废弃菌袋鸡粪堆肥发酵制备微生物菌肥的探索[J]. *基因组学与应用生物学*, 2018, 37(3): 1237 – 1242.