不同配比玉米秸秆调理剂对沼渣堆肥性能的影响

习彦花[1],刘 敬[1,2],王馨芝[1,2],吴 健[1,2],杨 玲[1,2],林 勇[1,3],程辉彩[1*]
(1. 河北省科学院生物研究所,河北 石家庄 050081; 2. 河北科技大学 食品与生物学院,河北 石家庄 050018;
3. 河北工程大学 园林与生态工程学院,河北 邯郸 056038)

摘 要: 为探索抗生素菌渣的无害化、资源化和高附加值处理途径,防止二次污染,以来源于青霉素菌渣的厌氧发酵沼渣为主要原料、玉米秸秆作为调理剂进行好氧堆肥研究,考察添加不同比例玉米秸秆对沼渣好氧堆肥温度、pH值、EC、氨氮、GI等腐熟效果的影响,对堆肥结束之后产品的酶活、营养成分等进行分析,并通过盆栽实验验证堆肥产品的应用效果。试验结果表明添加43%的玉米秸秆作为调理剂与沼渣进行混合堆肥,堆体升温迅速最高达61.25 ℃,高温期(≥55 ℃)持续5~6天,堆肥结束时GI值最高达到107.75%。以玉米秸秆作为调理剂时,还可调节堆肥体系的pH值,提高纤维素酶和蔗糖酶活性,促进腐殖质的形成,有效改善堆肥质量。应用效果表明该堆肥产品能够有效促进白三叶生长,株高和根长分别显著提高了26.32%、39.64%,同时显著增加植株叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量,较不施肥增幅分别为12.67%、24.31%和10.50%,效果优于同施用量(10%)市售有机肥。试验结论表明添加适当比例的玉米秸秆作为调理剂可显著提高源于青霉素菌渣的沼渣堆肥腐熟效果,提高堆肥产品品质,明显促进植株生长。该结果可为源于青霉素菌渣的沼渣堆肥过程中调理剂种类的选择和添加比例提供参考。

关键词: 玉米秸秆; 青霉素菌渣; 沼渣堆肥; 应用效果
中图分类号: S216.4; X71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)06-0046-09
DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023060046

Effect of Corn Straw as Conditioner on Biogas Residue Compost Quality and Preliminary Application

/ XI Yanhua[1], LIU Jing[1,2], WANG Xinzhi[1,2], WU Jian[1,2], YANG Ling[1,2], LIN Yong[1,3], CHENG Huicai[1*] / (1. Biology Institute, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050081, China; 2. College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 3. College of Landscape and Ecology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: To explore the harmless, resourceful and high added value treatment methods of antibiotic residue to prevent secondary pollution. The anaerobic fermentation biogas residue from penicillin residue as the main raw material and corn straw as the conditioner were used for aerobic composting; Investigate the effect of adding different proportions of corn straw on the temperature, pH, EC, ammonia nitrogen, GI, etc of biogas residue aerobic composting, analyze the enzyme activity and nutrient composition of the product after composting, and verify the application effect of the compost product through pot experiment, 43% corn straw was added as a conditioner and mixed with biogas residue for composting, the pile body heats up rapidly up to 61.25 ℃, the high temperature period (≥ 55 ℃) lasts for 5~6 days, and the GI value reaches 107.75% at the end of composting. When corn straw is used as a conditioner, it can also adjust the pH value of the compost system, improve the activities of cellulase and sucrase, promote the formation of humus, and effectively improve the quality of compost. The application effect shows that the compost product can effectively promote the growth of white clover, the plant height and root length are significantly increased by 26.32% and 39.64% respectively, and the content of chlorophyll, soluble sugar and soluble protein in the plant is significantly increased by 12.67%, 24.31% and 10.50% respectively compared with that without fertilization, and the effect is better than that of the same amount of organic fertilizer (10%) sold in

收稿日期: 2023-01-12 **修回日期:** 2023-02-26
项目来源: 河北省重点研发项目(20327302D; 22373803D); 河北省科学院高层次人才培养与资助项目(2021G01); 河北省科学院重点研发项目(22302; 23302)。
作者简介: 习彦花(1986-),女,汉族,河北平山人,副研究员,主要从事固体有机废弃物的资源化利用研究等工作,E-mail: xiyanhua86@163.com
通信作者: 程辉彩,E-mail: huicaicheng@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the market; Adding proper proportion of corn straw as a conditioner can significantly improve the composting effect of biogas residue from penicillin residue, improve the quality of compost products, and significantly promote plant growth. The results can provide a reference for the selection of conditioner types and addition ratio in the composting process of biogas residue derived from penicillin residue.

Key words: corn straw; penicillin residue; biogas residue compost; application effect

我国是世界上最大的抗生素生产国和消费国，目前自产青霉素年产量高达 10 万 t，占国际市场份额的 90%[1]。湿菌渣作为抗生素生产过程中产生的固体废物，每年产生量约 1000 万 t，其中 β-内酰胺类菌渣约占 78%，其利用处置环节是抗生素风险防控中的重点[2]。抗生素菌渣是一种富含有机物的生物质资源，目前有热化学转化[3]、厌氧发酵[4]、肥料化[5]及蛋白质回收[6]等再利用方式。国内学者 Li S[7] 等于 1988 年初次报道了卡那霉素菌渣和酒糟混合厌氧发酵产沼气的可行性[7]。随后众多学者分别证实采用厌氧消化技术处理抗生素菌渣是一种可安全转化菌渣中抗生素残留和抗性基因的有效技术，在降低污染物的同时产生清洁能源[8-11]。尽管该途径的资源化程度较高，但由于来源敏感性，仅采用单一的厌氧消化技术处理尚无法做到完全脱毒，其产生的固体或液体残余物处理处置环境风险在学术界仍存在一定争议[4,12]。因此挖掘其消化产物的潜在优势，寻找一条无害化、高附加值出路，探寻适合其特色的应用标准对于制药行业来说至关重要。

好氧堆肥是一种处理源于畜禽粪污等沼渣的常用方式，可弥补其直接还田的缺陷，并有效提高有机肥品质，防止二次污染[13]。张黎阳[14]等认为沼渣由于含水率高、自身 C/N 较低、纤维素类等难降解有机物较多，单独好氧堆肥时腐殖化程度较低、C 素和 N 素损失较多，难以达到理想效果。吉婕莉[15]、曲京博[16]、徐彦胜、白玲[17]等众多学者研究表明在沼渣堆肥时添加畜禽粪便、秸秆、生物炭等调理剂可显著提高堆肥效率及其腐熟效果。秸秆由于其自身有机物丰富可以作为能量调理剂，同时其外壳坚硬又可以作为结构调理剂来使用。我国是农业大国，每年农业生产中产生的各类秸秆高达 8 亿 t，其中玉米秸秆约有 3.5 亿 t[18]，体量大、价格低廉且易获取，利用玉米秸秆进行混合堆肥不仅可以减少农业面源污染还能带来可观的经济价值。

为解决抗生素菌渣厌氧消化资源化的衍生品-沼渣未得到有效利用的问题，本文采用玉米秸秆作为调理剂与源于青霉素菌渣的沼渣及牛粪进行混合堆肥，研究堆肥过程中堆温、物料理化性质、养分变化等情况，并通过盆栽试验以验证产品肥效，为源于青霉素菌渣的沼渣堆肥及产品还田提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

堆肥原料为沼渣和牛粪的混合物，沼渣为青霉素菌渣厌氧发酵经过固液分离后的沼渣，水利停留时间为 20 d；新鲜的牛粪取自石家庄某养殖场，去除石子等杂物后 -20 ℃冰箱保存备用。

调理剂为玉米秸秆，取自石家庄农田，自然风干后粉碎至 1.0 ~ 1.5 cm，储存备用。

各原料具体理化性质如表 1 所示。

表 1 堆肥原料及调理剂基本理化性质

原料	pH 值	EC	MC/%	VS/%	N/%	C/%	H/%	S/%	青霉素 G 残留
沼渣	8.52	—	90.50	4.63	3.80	34.69	3.14	2.00	未检出(<0.05)
玉米秸秆	—	3.13	5.71	86.90	0.75	45.11	4.95	0.14	—
牛粪	7.50	—	81.32	14.85	1.97	36.54	4.14	0.38	未检出(<0.05)

注：EC 为电导率，MC 为含水率，VS 为挥发性固体，N、C、H、S 分别为有机物中的氮、碳、氢、硫的含量，下同。

1.2 试验设计

1.2.1 玉米秸秆不同添加量堆肥实验设计

实验于 25.00 ℃恒温实验室进行。发酵装置为内径 33.00 × 25.00 × 15.50 cm、壁厚 4.00 cm 的泡沫箱，在泡沫箱顶部开口连接温度计，在侧边底部连接通风管路(每个箱体通风量为 0.25 $L \cdot kg^{-1} min$)，在另外一侧边开口连接硼酸溶液以吸收废气。

本实验以青霉素菌渣厌氧发酵后的残留物经过固液分离后的沼渣及牛粪为主要堆肥原料，玉米秸秆为调理剂。试验共设置 8 个处理，不添加调理剂

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对照组(T0),沼渣与玉米秸秆配制成不同的湿重比例(分别记为T1~T7)7个处理,每个处理3次平行;所有处理均辅以1 kg的牛粪调节堆肥原料的初始C/N为25~30∶1,含水率为60%~65%,总湿重2.5 kg。堆肥物料充分混匀后,将其装入堆肥反应器内,进行30 d的沼渣好氧堆肥实验。各处理堆肥原料添加量具体见表2。

表2 堆肥实验设计

处理		T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
玉米秸秆	添加比例/%	0.00	52.00	49.00	46.00	43.00	40.00	35.00	30.00
	添加量/kg	0.00	0.80	0.72	0.70	0.65	0.60	0.58	0.50
源于青霉素菌渣的沼渣/kg		1.50	0.70	0.78	0.80	0.85	0.90	0.92	1.00
牛粪/kg		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

1.2.2 白三叶室内盆栽实验

供试植物:白三叶。

试验设计:选取试验1.2.1效果最佳的堆肥产品与蛭石混合作为栽培基质进行室内盆栽试验,共设置7个处理,以不施肥为空白对照组(CK),以添加10%的市售有机肥(商品名:绿叶宝)做为阳性对照组(PCK);堆肥产品处理组S1~S5,施用量分别为5%、10%、15%、20%和25%。所有处理为等氮磷钾施入,总养分为6.9%。每盆播种10粒白三叶种子,种植时间为40 d,试验期间常规管护,收获时植株部分全部采集。

表3 室内盆栽实验设计 (%)

处 理	CK	PCK	S1	S2	S3	S4	S5
施肥量	0	10	5	10	15	20	25

1.3 测定项目及方法

1.3.1 样品采集

堆肥进行30天,每隔3天翻堆一次,在翻堆的同时用5点取样法在堆体的上、中和下各3个深度进行取样,取样时间分别为第0、3、6、9、12、15、18、21 d,每次取样量为30 g左右。充分混匀后,立即取5 g样品保存于-80.0 ℃冰箱用于微生物群落结构测定,剩余样品保存于4.0 ℃冰箱用于基本理化性质测定;堆肥结束后,取一部分样品自然风干后用于相关酶活检测。

1.3.2 指标测定

堆肥实验测试指标:堆体的温度、pH值、EC、GI、NH_4^+-N、E4/E6;堆肥产品测试指标:有机质、TN、TP、TK、相关酶活以及青霉素G含量残留;室内盆栽实验指标:植株株高、根长、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白。样品中青霉素G残留采用液质联用方法检测,其余指标参照杨旭[19]方法进行。

1.3.3 数据处理与分析

本试验数据统计分析在Microsoft Excel 2016、SPSS 26.0中进行,由ORIGIN 2018绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同比例玉米秸秆对沼渣堆肥性能影响

2.1.1 温度变化

堆体温度是反应堆肥腐殖化程度的重要指标,添加不同比例的玉米秸秆对沼渣堆肥过程温度变化的影响如图1所示。堆肥过程中8个处理堆体温度随时间的变化特征基本一致,都经历了快速升温期、高温期(55.00 ℃以上)、腐熟前期以及腐熟期,与典型畜禽粪便堆肥过程温度变化基本一致。从堆肥开始到升温和高温期,添加调理剂的堆体温度明显高于对照T0;T0对照组在第6天达到最高温度56.97 ℃,55.00 ℃以上高温期持续3 d;调理剂处理中,堆肥第1天各堆体温度均迅速升至50.00 ℃以上,其中处理T1、T2在第3天达到最高温度62.83 ℃和62.74 ℃,55.00 ℃以上高温期持续7~8 d;处理T3、T4、T5处理最高温度为61.21 ℃,55 ℃以上高温期持续5~6 d;处理T7在第4天达到最高温度58.32 ℃,55.00 ℃以上高温期持续5天。堆肥进行到第11~12天后各处理的堆体温度开始呈逐渐下降趋势,在该阶段CK处理的堆体温度明显低于调理剂处理,说明该处理由于营养物质较少更早进入腐熟期。在堆肥进行到第30天时堆体温度与环境温度相同,堆肥由腐熟前期进入腐熟期,7个处理均达到《粪便无害化卫生标准(GB7959—87)》中的无害化处理要求。该结果与邱珊[20]等沼渣与水稻秸秆混合堆肥结果基本一致。从本研究中堆体温度变化情况看,添加玉米秸秆有利于源于青霉素菌渣的沼渣堆肥的腐熟,并且在本研究梯度条件下,玉米秸

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

秆添加比例越多,堆体升温速率越快,最高温度越高,高温期持续时间越长。分析原因是由于玉米秸秆在添加后改善了堆体的透气性,物料内部孔隙率增加,通气效果有所改善;另一方面玉米秸秆的添加增加了堆体中可利用碳源,微生物活性增加,加快了有机质的降解速度,导致升温迅速,高温期时间延长。

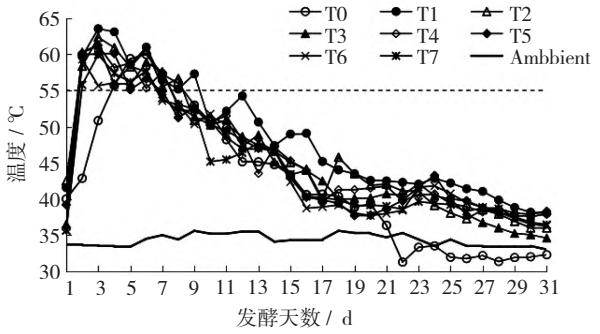

图 1 玉米秸秆与沼渣不同配比混合堆肥温度变化

2.1.2 pH 值、EC、氨氮以及 E4/E6 变化

堆肥过程中 pH 值的变化与堆体内产酸与氨化作用的大小有关,添加不同比例的玉米秸秆对沼渣堆肥 pH 值变化的影响如图 2 所示。本研究沼渣堆肥过程中,不同处理堆体的 pH 值整体上随时间推移呈先升高后下降逐渐趋于平稳的变化特征;但各处理间又具有明显的差异。堆肥开始前,堆体的 pH 值均呈弱碱性,为 7.50 ~ 8.20,且沼渣占比越多 pH 值越高,T0 对照的 pH 值最高为 8.48。随着堆肥的进行,第 0 ~ 6 天各处理堆体的 pH 值均逐渐升高并达到最大值。其中处理 T5 堆体的 pH 值增高最为迅速,在第 6 天达到最大值 8.73,说明堆体微生物的氨化作用与有机氮的矿化作用加强并不断释放氨气,而产酸过程减弱,进而导致 pH 值升高;其次为处理 T6 和 T7,在第 6 天 pH 值分别达到 8.42 和 8.41,差异不显著;处理 T4 在第 6 天达到 8.15;处理 T1、T2 和 T3 的 pH 值趋势最为缓和,变化幅度较小,三者之间差异不显著。随着反应进行,大部分有机质分解转换为小分子有机酸,使得 pH 值逐渐降低并趋于稳定。堆肥结束时,T0 对照的 pH 值最低仅为 7.14,添加玉米秸秆的各堆体 pH 值保持在 7.66 ~ 7.87,依次为 T7(7.87) > T1(7.84) > T5(7.78) > T6(7.73) > T4(7.69) > T3 = T1(7.66),说明各个堆体均已腐熟,符合高温堆肥产品腐熟的 pH 值标准(7.00 ~ 8.50)。分析认为不同处理堆体 pH 值变化结果与堆肥物料中玉米秸秆所占比例有关,物料的有机物种类和含量存在差异,导致堆肥过程中的微生物种群及有机质降解过程不同。

各处理堆体 EC 值变化趋势与 pH 值的变化保持一致,具体如图 3 所示。起始堆体中沼渣含量越多 EC 值越大,因为沼渣中具有较高的溶解性无机盐,其中 T0 对照的 EC 值最高为 3.13。发酵过程中各处理 EC 值表现为先升高后降低的趋势。分析原因为:堆肥初期大分子有机质被降解成可溶性的铵盐、有机酸等小分子物质,从而造成 EC 值升高。随着堆肥反应的进行,有机酸大量降解,NH_3、CO_2 的排放并形成腐殖质,各处理 EC 值逐渐下降并趋于稳定。堆肥结束时 EC 值稳定在 1.55 ~ 1.91 ms·cm^{-1}。其中处理 T0 由于含有高浓度沼渣,EC 值最大为 2.46 ms·cm^{-1},其他依次为 T6 = T7(1.69) > T5 = T4 = T2(1.64) > T3(1.61) > T1(1.55),且各处理 EC 值均 < 4.0 ms·cm^{-1},表明堆肥产品可正常使用,对种子发芽无不良影响。

氨氮是反应堆肥矿化的重要指标,不同处理堆肥过程中氨氮含量动态变化如图 4 所示。初始阶段,堆体中沼渣所占比例越高,氨氮含量越大,T0 对照的氨氮含量最高为 1627.25 mg·kg^{-1},其次为处理 T7(1328.43 mg·kg^{-1})。发酵开始后,各堆体均呈现出逐渐下降的趋势,尤其在高温期下降最为迅速,之后下降速度变缓并最终趋于稳定。堆肥结束时,T0 对照的氨氮含量最高为 491.83 mg·kg^{-1},添加玉米秸秆各处理氨氮含量降至 400.00 mg·kg^{-1} 以下,说明堆肥达到腐熟。其中 T2 处理氨氮含量最小(236.53 mg·kg^{-1}),T6 处理最高(359.75 mg·kg^{-1})。这与一般堆肥中氨氮先升高后下降的趋势不同,该研究结果差异可能与堆肥原料的性质以及有机物种类和含量有关。沼渣中营养物质主要是已经分解的小分子氨氮等物质,并且玉米秸秆中氮含量较低,尤其在发酵高温时期,堆体 pH 值偏高,微生物活动较为剧烈,氨氮易挥发且被利用较多,便会导致氨氮含量一直处在下降趋势。

E4/E6 是衡量堆肥腐熟度的评判标准之一,其值越小表明聚合程度越高,堆体腐熟越快。在本研究中各处理 E4/E6 动态变化如图 5 所示,与氨氮变化相似,8 个堆体的初始 E4/E6 值随着玉米秸秆比例的增加逐渐升高,T0 对照的 E4/E6 值最小为 6.81,说明沼渣中有机物已部分腐殖化;在高温期 E4/E6 值下降速度较快,说明堆肥腐殖化程度加剧;随着堆肥过程的进行,E4/E6 值逐渐趋于平稳;堆肥结束时,T0 对照的 E4/E6 值降至 3.83,添加玉米秸

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

秆各处理 E4/E6 值降至 4.00～6.00,说明堆肥均达到腐熟。其中 T7 处理最小为 4.12,其次为 T6 处理

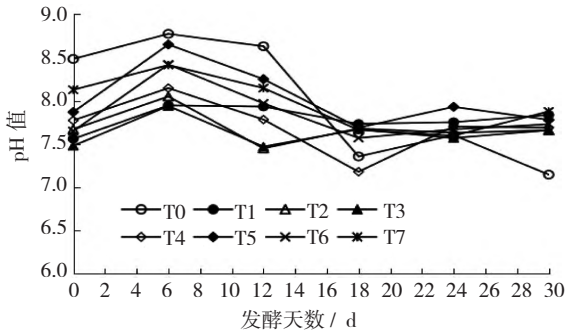

图 2 不同配比与沼渣混合堆肥 pH 值变化的影响

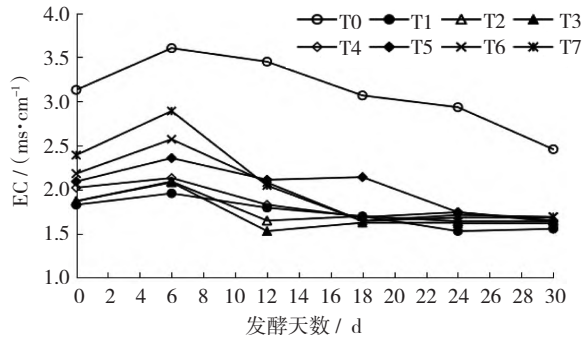

图 3 不同配比与沼渣混合堆肥 EC 值变化趋势

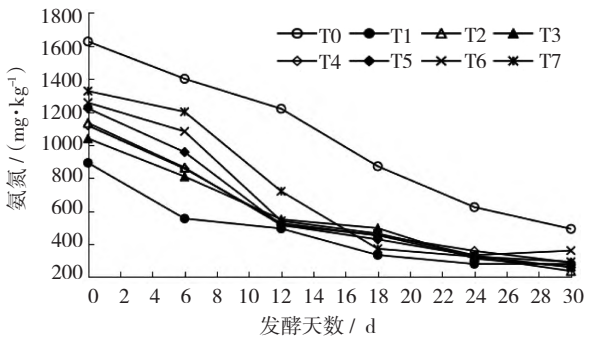

图 4 不同配比与沼渣混合堆肥氨氮含量变化

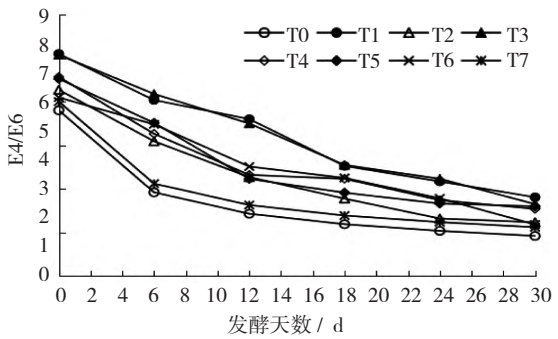

图 5 不同配比与沼渣混合堆肥 E4/E6 动态变化

(4.18),T1 处理 E4/E6 值最高(4.81),这也说明玉米秸秆的添加比例并非越高越好,在一定程度上增加了堆体腐熟难度。

2.1.3 GI 值变化

GI 值是反应堆肥腐熟度的重要指标,是对种子发芽抑制程度最直观的生物学指标。不同处理堆肥过程中 GI 动态变化如图 6 所示。各处理组初始种子发芽指数处于中等水平,但还未达到腐熟标准,是因为主要原料沼渣已具有一定的腐熟度。发酵过程中不同处理组 GI 值变化趋势相似,随着堆肥的进行均呈现出先下降后逐渐上升的趋势,该结果与卢妙[21]研究结果一致。分析原因是因为第 0～6 天,堆体处于急速升温期和高温期,由于通风和氧气供应不足,产生一定的酸、醛等植物毒性物质,严重影响种子发芽和生长,导致 GI 值下降;随着发酵进行,堆体中有机酸等毒性物质被分解为对植物生长有促进作用的养分物质,使得堆体 GI 值快速上升;在堆肥结束时,未添加玉米秸秆的对照组 GI 值仅为 78.98%,未能满足《粪便无害化卫生标准(GB7959—87)》中的完全腐熟要求。添加玉米秸秆的 7 个处理 GI 值均达到了 80% 以上,说明物料经过好氧堆肥,已消除对植物的毒性。其中 T4 堆体样品的种子发芽指数最高达到了 107.75%,其次为处理 T6、T7 的 GI 值分别为 101.82% 和 100.95%($p>0.05$),说明此 3 个处理的堆料有利于植物生长。T5、T3 处理 GI 值均 >90%($p>0.05$),说明堆体达到完全腐熟。最后为处理 T2、T1,GI 值仅为 87.14% 和 82.08%,基本达到堆肥腐熟要求。用 GI 值评价堆肥腐熟程度的结果与用 E4/E6 值评价基本一致,说明玉米秸秆添加比例只有维持在合理范围之内,才能有效提高堆体的腐熟效果,降低堆肥产品植物毒性,强化堆肥深度腐熟。

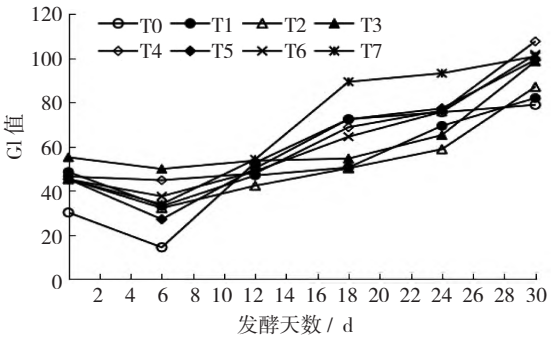

图 6 不同配比玉米秸秆与沼渣混合堆肥过程中 GI 值的变化

2.1.4 堆肥产品酶活

生物酶活性能够深入反映堆肥过程中有机物质的降解、堆肥产品的腐熟程度以及各种有毒物质的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

转化情况,7 个不同堆肥处理产品的纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶以及过氧化氢酶活性比较如表 4。脲酶是一种与氮素转化密切相关的酶,可促进含氮物质降解作为植物的氮源。随着秸秆添加比例的增加,不同处理堆肥产品的脲酶活性也逐渐增强。处理 T7 最低仅为 3.45 $mg \cdot g^{-1}d^{-1}$,处理 T1 最高达 10.16 $mg \cdot g^{-1}d^{-1}$,说明不同的堆肥原料对脲酶活性的影响较大。玉米秸秆的添加增强了堆料中尿素的水解,堆肥中后期有机氮含量的升高主要与腐殖质等含氮有机物的合成有关。纤维素酶是反映纤维素降解的主要酶系,呈现出与脲酶同样的趋势,这与发酵物料中玉米秸秆的含量占比有关。说明玉米秸秆这一高 C/N 比物料的添加增强了分解纤维素的微生物活性,促进了物料中的木质纤维素和木质素的降解。蔗糖酶是一种重要的水解酶,可满足微生物对碳源及能源的需求,同时与纤维素酶密切相关。7 个不同处理中,T5 样品中蔗糖酶活性最低仅为 8.25 $mg \cdot g^{-1}d^{-1}$,说明该处理有机物分解最为彻底,堆体最早达到稳定。其次为 T2、T3、T7,三者之间差异不显著。类似的,处理 T6、T7 样品的碱性磷酸酶活性最低,分别为 23.18 和 25.82 $mg \cdot g^{-1}d^{-1}$,说明该两组处理腐熟速度较快,产品中的磷元素更加稳定。过氧化氢酶活性可以反映堆肥过程中有机物的转化效率和氧化分解强度[18]。张思洋[21]认为堆肥过程中过氧化氢酶的最高值与沼渣成分含量显著正相关。与上述不同,本研究中 T0 对照组过氧化氢酶活性最低,随着玉米秸秆添加比例的增加,过氧化氢酶活性逐渐升高,说明玉米秸秆的添加促进了堆肥过程中过氧化氢的产生,同样说明玉米秸秆作为调理剂时的添加比例并非越高越好。

表 4 沼渣与玉米秸秆不同配比堆肥产品酶活比较 ($mg \cdot g^{-1}d^{-1}$)

处 理	纤维素酶	蔗糖酶	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶
T0	1.43 ±0.03e	5.39 ±0.04e	2.73 ±0.05f	24.33 ±3.30c	3.93 ±0.33a
T1	2.93 ±0.24a	11.95 ±0.54a	10.16 ±1.05b	28.47 ±0.49ab	6.87 ±0.55b
T2	2.33 ±0.03b	9.17 ±0.12b	11.00 ±0.10a	30.38 ±4.07a	6.16 ±0.09c
T3	2.08 ±0.01c	9.43 ±0.43b	8.78 ±0.25c	31.37 ±4.81a	5.66 ±0.18d
T4	2.01 ±0.11c	8.35 ±0.12c	4.35 ±0.41d	27.76 ±1.66b	4.59 ±0.58e
T5	1.51 ±0.15e	8.25 ±0.09c	3.76 ±0.19e	26.59 ±4.81b	4.38 ±0.09ef
T6	1.44 ±0.03e	7.37 ±0.37d	3.79 ±0.09e	23.18 ±1.36c	4.22 ±0.26f
T7	1.39 ±0.07d	6.90 ±1.28d	3.45 ±0.33e	25.82 ±1.57c	4.34 ±0.35ef

2.1.5 堆肥产品品质

由于初始堆体中玉米秸秆与沼渣两者比例不同,发酵过程中微生物变化及各项指标有差异,导致最终体系中的营养元素含量也不同。选取本研究中初始物料差异较大的 3 个处理组的堆肥产品进行了营养成分分析,结果如表 5 所示。T1、T4、T7 这 3 个处理堆料,总养分分别为 6.51%、7.07% 和 6.61%,其中 T4 堆体中总养分含量最高,显著高于其他两组。堆肥中氮元素的含量是评价堆肥经济价值、腐熟度与风险值的重要指标,本研究中 T1、T4、T7 这 3 个处理总氮含量(TN)分别为 2.45、2.56、2.35,无显著差异;磷元素是堆肥中重要的营养元素之一,其含量直接影响着堆肥的肥效和品质,T1、T4、T7 处理总磷含量(TP)分别为 1.71、2.04、2.47,其中 T7 堆体 TP 含量最高,其次为 T4 处理,差异显著;3 个处理总钾含量(TK)分别为 2.35、2.47、1.85,T4 处理 TK 含量最高,其次为 T1 处理,差异不显著。AP 与 AK 是植物可以快速利用的速效养分,T4 堆体中 AP、AK 含量均最高。

整体来说,处理 T4 堆肥结束后营养物质含量较高,肥效更好。分析原因是由于处理 T1 中玉米秸秆占比最大,物料中含有大量难以分解的纤维素和木质素,因此堆肥结束时,T1 堆料中虽然有机质含量最高,但其腐熟度不如其他堆体,完全腐熟所需时间也高于其它堆体。而沼渣所占比例最高的 T7 处理组,堆体最高温度较低且高温期持续时间也较短,这与堆体中所含的有机质少于其他堆体有关。总之,沼渣堆肥中添加适当比例的玉米秸秆不仅可固持更多的 N 素,还可显著提高总 K 和水溶性 P、K 含量。此外,堆肥结束后 T1、T4、T7 这 3 个处理堆肥产品中均未检测到青霉素 G 含量残留,铅、镉、汞、铬、砷五种重金属含量均符合沼肥(NT/T 2596—2014)中的相关规定。说明源于抗生素菌渣的沼渣好氧堆肥过程中添加玉米秸秆调理剂促进了堆肥过程中残留抗生素的去除,可达到完全腐熟,有效阻止了其向土壤和植物中的转移。沼渣堆肥未带

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

来重金属二次污染,对植物完全无害,不会造成后续 环境风险。

表 5 沼渣与玉米秸秆不同配比堆肥产品腐熟与品质评价

参数	T1	T4	T7	有机肥料 NY—525	TMECC
pH 值	7.84	7.69	7.87	5.5~8.5	5.5~8.5
MC	25	25	26	≤30%	—
总养分	6.51	7.02	6.69	≥5%	—
C/N	12.37	11.42	11.65	—	≤25%
GI	82.08	107.75	100.95	—	80~90
有机物	54.56	52.66	49.31	≥45%	≥40%
TN	2.45	2.56	2.35	—	—
TP	1.71	2.04	2.47	—	—
TK	2.35	2.47	1.87	—	—
AP/(mg·kg^{-1})	4230.77	4516.62	4242.21	—	—
AK/(mg·kg^{-1})	15547.33	15996.41	13667.20	—	—
青霉素 G	未检出(<0.05)	未检出(<0.05)	未检出(<0.05)	—	—

2.2 堆肥产品初步应用

2.2.1 不同施肥处理白三叶生长特征变化

植株的生长受很多因素的影响,同一品种不同生长环境植株生长情况也不同,如图 7、图 8 所示,不同施肥处理对白三叶株高及根长有明显影响。不施肥 CK 组株高和根长长度最短,这是因为蛭石中基本营养元素较少,不利于植株生长。添加 10% 市售有机肥的 PCK 效果优于 CK,株高和根长分别显著提高了 53.41% 和 9.06%。添加 5% 堆肥产品的处理 S1 植株株高比 CK 显著提高了 48.37%,根长与 CK 相比无显著差异。与 PCK 相比,添加 10% 堆肥产品的处理 S2 肥效最佳,株高和根长分别显著提高了 26.32%、39.64%,其次为添加 15% 堆肥产品的处理 S3,两组之间差异不显著。随着堆肥产品添加比例的增加,株高和根长均有所下降。这说明堆肥产品施加超过一定量,对白三叶的生长促进作用不明显甚至会抑制其生长。在添加量低于 10% 的范围内,植株株高和根长随着堆肥产品施加量的增长而有所升高,但是在堆肥产品施加量超过 10%,堆肥产品对白三叶株高和根长无显著促进作用。

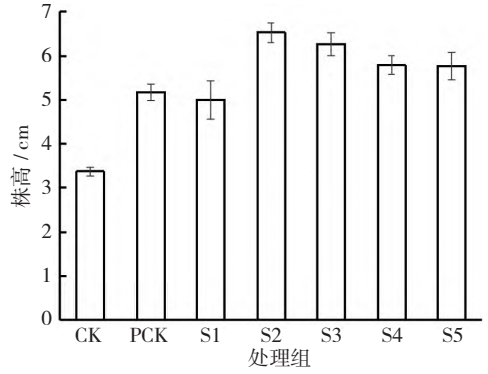

图 7 不同施肥处理白三叶株高

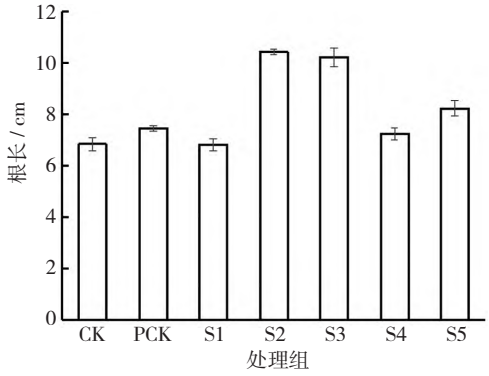

图 8 不同施肥处理白三叶根长

2.2.2 不同施肥处理白三叶植株叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白变化

不同施肥处理白三叶植株叶绿素、可溶性糖和蛋白的变化如图 9~10 所示,不施肥 CK 处理叶绿素含量最少,是因为蛭石中营养物质最少,生长状况欠佳。随着堆肥产品添加量的增加,植株叶片中叶绿素含量逐渐提高,添加 10% 堆肥产品的处理 S2 三叶草中叶绿素含量最高,相比 CK 组提高了 12.67%。然而在堆肥产品添加比例超过 10% 后,各处理组叶绿素含量无显著差异。可溶性糖可以提高抗逆性,增加植物的抗干旱能力和为植物提供能量。可溶性蛋白也可以提高植物的抗逆性,同时为植物生长提供重要的能源供应。不施肥 CK 处理可溶性糖含量最低,添加 10% 堆肥产品的处理 S2 可溶性糖含量最高,相比 CK 提高了 24.31%($p<0.05$)。随着堆肥产品施用量的增加,植株可溶性

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

糖含量显著增加,在施加量超过 10% 之后,可溶性糖含量无显著变化,但是施加堆肥产品植株中可溶性糖含量均高于 CK 组。类似的,CK 处理可溶性蛋白含量最少,添加 5% 堆肥产品的处理 S1 与 PCK 市售有机肥组之间无显著差异。随着堆肥产品施用量的增加,植株中可溶性蛋白含量逐渐增加,添加 10% 堆肥产品的处理 S2 比 CK 组提高了 10.50%($p < 0.05$),当添加比例超过 10% 后各组之间无显著变化。

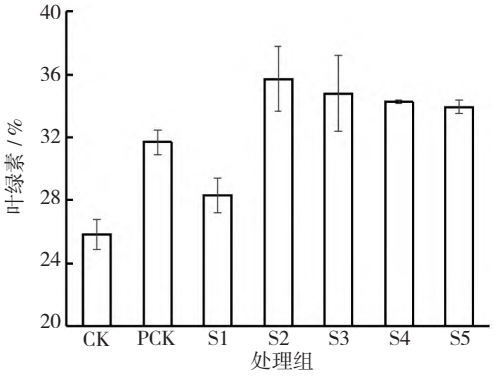

图 9 不同施肥处理白三叶叶绿素变化

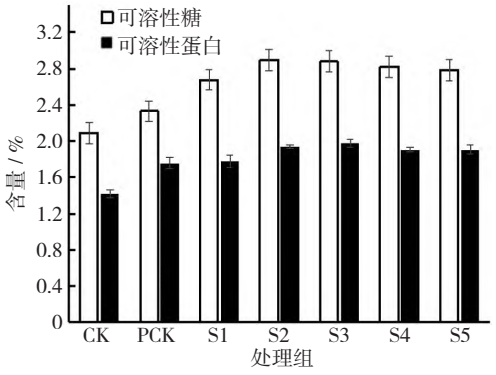

图 10 不同施肥处理白三叶可溶性糖、可溶性蛋白变化

3 讨论

有机物的高温好氧堆肥过程受堆体温度、物料 C/N、pH 值、添加剂等自然或人为等众多因素的影响[13]。本研究中,堆体升温和高温阶段,添加调理剂处理组堆温均明显高于 CK,高温期(≥55 ℃)持续时间更长。表明添加调理剂能加快堆肥启动速度和反应过程,这可能是因为调理剂的添加能改善堆体物理结构,调节物料碳氮比的同时促进碳氮平衡,为升温和高温阶段功能微生物的生长提供良好的生态环境及养分含量,促进其代谢和繁殖,进而加快有机质的分解。适宜的酸碱度可为微生物的繁殖代谢提供良好条件,促进堆肥反应的进行[22]。本研究中,添加玉米秸秆调理剂还可调节堆体 pH 值,尤其在堆肥腐熟阶段,调理剂处理的堆体 pH 值较 CK 有显著提升。电导率(EC)主要反映堆体中存在的可溶性盐的浓度,一般认为当 EC 值小于 9.00 ms·cm^{-1}时,对种子发芽没有抑制作用;当 EC 值小于 4.00 ms·cm^{-1}时,可施用于土壤中且不会对植物产生抑制作用[23]。本研究中所有添加玉米秸秆的处理组 EC 值在 1.55 ~ 1.91 ms·cm^{-1},远远小于 4.00 ms·cm^{-1},均可排除盐害对植物种子发芽及生长的影响。发芽指数(GI)既能代表种子发芽率,也可表示毒性物质对种子生根的影响。当 GI 大于 100% 时,则表示堆肥产品对种子生长有一定的促进作用。本研究中玉米秸秆添加比例为 43.00% 时的 T4 处理组 GI 值最高达 107.75%,不仅不会对植物产生毒害作用,还可促进其发芽生根。

有机肥合理施用可有效提升土壤有机质含量,改善土壤结构和理化环境,进而促进植物生长[12]。张媛[24]通过研制沼渣的生物有机肥及沼渣生物基验证了沼渣好氧发酵后可以生产商品化生物有机肥通及沼渣生物基的可行性;李涛[25]等研究结果表明施用沼渣及畜禽粪混合堆肥产品可使西红柿幼苗株高及茎粗分别显著增加 15.90%、23.84%,成熟期单株产果量显著增加 19.14%。马克双[26]等认为以 70% 沼渣有机肥替代化肥能显著提高茶叶的芽梢密度、百芽重和成品茶的品质。本研究中添加 10% 沼渣堆肥产品处理的白三叶株高和根长分别比不施肥对照高 93.77% 和 52.34%,比同施用量的市售有机肥高 26.31% 和 30.68%;同样的添加 10% 沼渣堆肥产品处理的白三叶植株中叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量分别比不施肥对照高 38.25%、38.88% 和 37.27%,比同施用量的市售有机肥高 12.65%、24.33% 和 10.47%,与前人研究结果相似,表明施用沼渣堆肥产品对白三叶吸收 N、P、K 元素的促进作用更好,养分利用率更高。

本研究选择制药行业产量最大青霉素菌渣为原料进行厌氧消化所产生的沼渣与牛粪进行混合堆肥,结果表明添加 43% 的玉米秸秆作为调理剂可有效促进堆肥腐熟进程并提高产品品质。然而,制药行业还包括众多不同类型的抗生素菌渣,种类的不同将会引起沼渣理化性质、抗生素及重金属含量的巨大差异,因此各类添加剂对源于不同抗生素菌渣的沼渣堆肥的影响有待开展进一步研究。此外本研究采用室内盆栽实验对堆肥产品的功效进行了初步验证,鉴于堆肥物料来源敏感性,需在后续的工作中继续开展田间环境下堆肥产品对土壤化性质、营养状况、重金属形态分布以及植株体内重金属含量等

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的长期研究。

4 结论

向源于青霉素菌渣的沼渣堆肥中添加43%的玉米秸秆作为能量和结构调理剂,能有效改善堆体通气及营养状况,加快沼渣堆肥的启动速度和腐熟进程,堆体温度最高可达61.25℃,高温期(≥55.00 ℃)持续5~6天;还可以调节沼渣堆肥体系的pH值,提高纤维素酶和蔗糖酶活性,降低过氧化氢带来的毒害作用,促进腐殖质的形成,有效改善堆肥质量。

添加43%的玉米秸秆作为调理剂,可显著提高沼渣堆肥产物中的养分含量,有机质含量达52.66%,全氮、全磷、全钾含量分别为2.56%、2.04%和2.47%,速效磷和速效钾含量为4.52 $g \cdot kg^{-1}$和16.01 $g \cdot kg^{-1}$;堆肥结束时物料完全腐熟,堆肥产品GI值最高达107.75%,青霉素G残留未检出,重金属污染风险较低,无潜在环境及生态风险。

添加43%的玉米秸秆作为调理剂的堆肥产品较不施肥对照组能显著提高白三叶的株高及根长,增加白三叶植株叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白含量,且效果优于市售有机肥(10%),增幅分别为26.3%、39.6%、12.6%、24.3%和10.5%。

参考文献:

[1] 马 双. 青霉素菌渣肥料基料对土壤环境和油菜生长的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学,2021.

[2] ROOSE-AMSALEG C, LAVERMAN A M. Do antibiotics have environmental side-effects? Impact of synthetic antibiotics on biogeochemical processes [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(5): 4000-4012.

[3] 李益飞. 青霉素菌渣热解产物特性及生物油催化脱氮机制[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.

[4] 石 樾. 青霉素菌渣-玉米秸秆联合制有机肥料工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2021.

[5] 平 然,任爱玲,田书磊,等. 两种抗生素菌渣经SEA-CBS技术处理后的肥料特性[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1945-1951.

[6] 杨 珂. 嗜热菌水解青霉素菌渣及蛋白质提取研究[D]. 石家庄: 河北科技大学,2021.

[7] LI S, HE C. A study of biogas formation of distillers grains and residue of kanamycin fermentation [J]. J Microbiol. 1988,8(2):11-15.

[8] LI LM, CHEN Y, LING GC, et al. Studies on anaerobic biological treatment of rifampicin mycelia [J]. Chin J Liaoning Univ. 1992,19(3):70-74.

[9] MENG XY, DAI JL, ZHANG Y, et al. Composted biogas residue and spent mushroom substrate as a growth medium for tomato and pepper seedlings [J]. Journal of Environmental Management,2018,216: 62-69.

[10] CAI L, CAO MK, CHEN TB, et al. Microbial degradation in the co-composting of pig manure and biogas residue using a recyclable cement-based synthetic amendment [J]. Waste Management,2021,126: 30-40.

[11] WANG NY, ZHAO KQ, LI FH, et al. Characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur cycling genes, microbial community metabolism and key influencing factors during composting process supplemented with biochar and biogas residue [J]. Bioresource technology, 2022, 366: 128224.

[12] LU MY, FENG Q, LI X, et al. Effects of arginine modified additives on humic acid formation and microbial metabolic functions in biogas residue composting [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, DOI: 101016/JJECE.2022.108675.

[13] 白 玲. 沼渣好氧堆肥腐殖化过程及其调控机制研究[D]. 无锡: 江南大学,2020.

[14] 张黎阳. 餐厨垃圾厌氧消化后沼渣的好氧堆肥优化研究[D]. 杭州: 浙江大学,2020.

[15] 吉婕莉. 猪粪掺混稻秆固态沼气发酵及沼渣好氧堆肥耦合工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学,2021.

[16] 曲京博. 生物炭对沼渣好氧堆肥的影响机制及肥效评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2021.

[17] 白 玲,宋飞跃,季蒙蒙,等. 不同调理剂对秸秆沼渣堆肥的影响[J]. 浙江农业学报,2020,32(01):124-133.

[18] 杨 旭. 不同调理剂对鸡粪好氧堆肥过程影响及有机肥还田效应分析[D]. 重庆: 西南大学,2020.

[19] 邱 珊,赵龙彬,马放,等. 添加秸秆对厌氧残余物沼渣堆肥影响的研究[J]. 中国沼气,2017,35(01):35-39.

[20] 卢 妙. 调理剂对污泥堆肥的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学,2018.

[21] 张思洋. 沼渣混合堆肥及其生物有机肥对番茄青枯病防控效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院,2019.

[22] 王 雨. 不同用量调理剂对猪粪好氧堆肥特性及应用效果的影响[D]. 成都: 四川农业大学,2017.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[24] 张 媛. 沼渣生物有机肥与沼渣生物基质研制[D]. 南京: 南京农业大学,2020.

[25] 李 涛,汪伦焰,郝宇峰,等. 基于市政沼渣及畜禽粪便的有机肥制备研究[J]. 天津农业科学,2022,28(01):81-86.

[26] 马克双,鲍广灵,陶荣浩,等. 沼渣有机肥替代化肥对茶叶产质量及土壤肥力的影响[J]. 现代农业科技, 2021(16):8-14.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net