

桂 阳,朱国胜,韦小庆,等. 玉米芯与畜禽粪便混合袋装堆肥发酵技术研究[J]. 江苏农业科学,2013,41(8):344-350.

玉米芯与畜禽粪便混合袋装堆肥发酵技术研究

桂 阳^{1,2}, 朱国胜^{1,2}, 韦小庆³, 刘朝贵³

(1. 贵州省现代中药材研究所, 贵州贵阳 550006; 2. 贵州省农业生物技术重点实验室, 贵州贵阳 550006;

3. 西南大学园艺园林学院, 重庆北碚 400700)

摘要:选用玉米芯与畜禽粪便为材料,研究袋装堆肥发酵的最佳技术参数,采用 C/N、发酵菌剂和含水量 3 因素进行正交试验。结果表明:玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵最优水平组合为 A₂B₂D₂,即 C/N 为(25~35):1,添加 VT-1000 发酵菌剂,含水量为 40%~55%;玉米芯与鸡粪最优水平组合为 A₂B₃D₃,即 C/N 为(25~35):1,添加 Bio 发酵菌剂,含水量为 55%~65%;玉米芯与猪粪最优水平组合为 A₃B₃D₃,即 C/N 为(35~40):1,添加 VT-1000 发酵菌剂,含水量为 55%~65%。虽然堆肥发酵结束后的有机质含量略有下降,但全磷和全钾含量均有所增加,堆肥毒性降低,且达到了堆肥腐熟度的要求。

关键词:玉米芯;畜禽粪便;发酵菌剂;袋装堆肥

中图分类号: S147.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)08-0344-07

我国是传统的农业大国,也是世界上农业废弃物产出量最大的国家。据不完全统计,全世界每年可产近 20 亿 t 的农作物秸秆,我国产 6 亿~7 亿 t,列世界之首,并以玉米、小麦和稻谷秸秆为主,约占总秸秆产量的 80%^[1]。同时,随着畜牧养殖业的规模化和集约化发展,畜禽粪便产量已近 30 亿 t^[2]。堆肥化是资源化和无害化利用农业废弃物的有效途径之一。黄国峰等^[3]、陈志宇等^[4]研究认为,堆肥发酵主要受堆料方式、温度、物料 pH 值、含水量及 C/N 等因子的影响,而堆肥成功的关键在于使微生物正常繁衍,要保证微生物旺盛生长和优势菌种的合理更替,则必须对环境因子进行适当调整以提高堆肥发酵效率。目前,堆肥发酵方式主要有直接条垛发酵、袋装发酵、桶装发酵等方法。条垛式发酵方式的研究

已较多,近年袋式发酵越来越受到人们的关注。如文国来等^[5]、潘飞等^[6]和黄燕翔等^[7]分别以 10 d 高温发酵堆肥后转入袋装继续发酵和直接袋装发酵 2 种方式对堆肥发酵效果进行研究,结果表明,2 种方式发酵的堆肥均能达到无害化要求,是废弃物处理的有效方法。但这些研究都对袋装发酵的相关技术参数进行筛选,也没有对农业废弃物玉米芯和畜禽粪便进行混合袋装发酵研究。本研究以玉米芯和畜禽粪便为材料,采用袋装堆肥发酵方法,选取 C/N、发酵菌剂和含水量 3 因素进行正交试验,以期筛选适宜袋装堆肥发酵的技术参数,建立玉米芯与畜禽粪便混合袋装堆肥发酵方法,满足千家万户小规模堆肥需要。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料

供试玉米芯、畜禽粪便及尿素等均购自贵州省农业科学院周边地区。玉米芯预先晒干、粉碎,畜禽粪便预先晒干备用。各堆制材料的基本性状见表 1。

微生物发酵菌剂:VT-1000 菌剂(北京沃土天地生物科技有限公司);Bio 高温快速发酵腐熟菌种(江苏新天地生物肥料工程中心有限公司)。

1.2 堆肥成分测定

堆肥前后,对样品进行成分分析,所需药品见表 2。

1.3 试验器材

试验器材包括:KDN-20D 井式消化炉,HN-02 凯氏定

清华大学出版社,2009:101-106.

[11]杨忠平,卢文喜,龙玉桥.改进 BP 算法在城市土壤环境质量评价模型的应用[J].重庆大学学报:自然科学版,2010,32(2):98-103,109.

[12]易飞.智能优化算法的研究及其在电网规划中的应用[D].北京:华北电力大学,2009.

[13]刘宇颖.细菌聚类算法及其在图像分割问题中的研究与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

收稿日期:2013-05-09

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2009BAI74B01、2009BAI74B02);贵州省贵阳市科学技术计划[编号:(2010)筑科农合同字第 1-农-17];贵州省科技计划[编号:黔科合院所创能(2010)4002,黔科合 NY 字(2011)3032];中央补助地方科技基础条件专项基金[编号:黔科条中补地(2010)4002];贵州省中药现代化科技产业研究开发专项(编号:黔科合社字[2009]5036 号、黔科合中药字[2011]5039 号)。

作者简介:桂 阳,女,贵州铜仁人,硕士,助理研究员,主要从事应用微生物研究。Tel:(0851)3762695;E-mail:guiyang2003@163.com。
通信作者:朱国胜,男,安徽泾县人,博士,副研究员,从事药用植物益生菌及食药真菌研究。E-mail:zgssah@aliyun.com。

[7]李 丽,张海涛.基于 BP 神经网络的小城镇生态环境质量评价模型[J].应用生态学报,2008,19(12):2693-2698.

[8]杨 娟,王昌全,李 冰,等.基于 BP 神经网络的城市边缘带土壤重金属污染预测——以成都平原土壤 Cd 为例[J].土壤学报,2007,44(3):430-436.

[9]郭晓婷,朱 岩.基于遗传算法的进化神经网络[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(10):116-119.

[10]周开利.神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M].北京:

表 1 堆制材料的主要成分含量及 C/N 比

| 原料 | 有机质 (%) | 全碳 (%) | 全氮 (%) | C/N | 全钾 (%) | 全磷 (%) |
|-----|---------|--------|--------|----------|--------|--------|
| 玉米芯 | 91.3 | 52.95 | 0.53 | 99.9 : 1 | 0.08 | 0.08 |
| 牛粪 | 66.5 | 38.57 | 1.78 | 21.7 : 1 | 0.05 | 0.15 |
| 鸡粪 | 25.5 | 14.79 | 1.65 | 8.9 : 1 | 0.85 | 1.54 |
| 猪粪 | 43.1 | 25.00 | 2.00 | 12.6 : 1 | 0.60 | 0.19 |
| 尿素 | | | 46.00 | | | |

表 2 堆肥成分测定所需药品

| 成分 | 药品 |
|-------|--|
| 有机质含量 | 重铬酸钾、浓硫酸、硫酸亚铁、邻啡罗啉指示剂 |
| 全氮含量 | 硒粉 - 硫酸铜 - 硫酸钾混合氧化剂、浓硫酸、盐酸 |
| 全磷含量 | 高酸 (硝酸 - 硫酸 - 高氯酸)、钼锑抗混合显色剂、氢氧化钠、浓硫酸、2,6 - 二硝基酚指示剂 |
| 全钾含量 | 高酸 (硝酸 - 硫酸 - 高氯酸) |

氮仪,HH - Y8 恒温油浴锅,SKML - B 数显不锈钢型电热板,FP6410 火焰光度计,UV - 721 分光光度计,恒温培养箱,数显温度计,培养皿,电子天平等。

1.4 试验方法

1.4.1 发酵料配方设计及堆制方法 正交试验:为了了解不同环境因子对农作物秸秆与畜禽粪便混合堆肥发酵过程的影响,试验以不同 C/N、发酵菌剂及含水量 3 因素,每个因素设 3 水平(表 3),选用 $L_9(3^4)$ 正交表做正交试验。每处理设 3 重复。试验过程中,C/N 以尿素调节,菌剂添加量为 0.3%。试验编号:玉米芯与牛粪(YXN 1 至 YXN 9),玉米芯与鸡粪(YXJ 1 至 YXJ 9),玉米芯与猪粪(YXZ 1 至 YXZ 9)。

表 3 玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥发酵正交试验因素及水平

| 水平 | 因素 | | | |
|----|---------------|-----------|-------|-----------|
| | A:C/N | B:菌剂 | C:空白列 | D:含水量 (%) |
| 1 | (20 ~ 25) : 1 | 无 | 1 | 30 ~ 40 |
| 2 | (25 ~ 35) : 1 | VT - 1000 | 2 | 40 ~ 55 |
| 3 | (35 ~ 40) : 1 | Bio | 3 | 55 ~ 65 |

原材料处理:将收集到的玉米芯晒干后粉碎,畜禽粪便晒干,将购买的微生物发酵菌剂预先稀释活化。混合搅拌:按表 3 中要求将玉米芯、畜禽粪便、微生物发酵菌剂充分混合均匀,加水至试验组所需水分含量。装袋、码堆、发酵:将以上混合均匀的物料分别装入 100 cm × 50 cm 的塑料编织袋后,压实封口。每处理的 3 个重复叠放堆制,使其升温、发酵。堆肥发酵时间为 50 d,堆肥过程中不翻堆。

1.4.2 温度测定及样品采集 每天 09:00 采用数显温度计测定每个发酵袋四周及中心处 5 个点温度,取其平均值为每重复当日的温度。堆制开始时和结束后,对堆料进行取样,每重复以五点采样法取样,各采样点等量取样,各重复间等量取样,每重复取样 200 g 左右。待取样完成,将每处理 3 个重复的样品混合均匀后带回实验室,即每处理取样 600 g 左右。将各样品平分为 3 份,一份保存至 4 ℃ 冰箱中备用;一份于 40 ℃ 恒温烘箱中烘干粉碎过筛,分析成分;一份立即进行水分、毒性的测定。

1.4.3 堆肥样品前后 C/N 变化(T 值)测定 Golueke 指出腐熟的堆肥 C/N 值小于 20 : 1^[8];但由于不同物料的初始和

终点 C/N 值的差异很大,而且许多堆肥原料的 C/N 值较低,从而影响了这一参数的广泛应用。Morel 等认为 C/N 小于 20 : 1 只是堆肥腐熟的必要条件,建议采用 $T = (\text{终点 C/N}) / (\text{初始 C/N})$ 来评价腐熟度,并提出当 T 值小于 0.6 时堆肥达到腐熟^[9]。也有人认为腐熟的堆肥 T 值应为 0.53 ~ 0.72 或 0.49 ~ 0.59^[10-11]。本研究采用 T 值小于 0.72 为腐熟标准。

1.4.4 堆肥样品成分测定 总有机碳测定采用重铬酸钾氧化法;全氮测定采用凯氏定氮法;全钾测定采用火焰光度计法;全磷测定采用钼锑抗比色法;有机质含量测定利用含碳量进行换算^[12]。

1.4.5 堆肥毒性检测 将样品与蒸馏水按 1 : 10 的比例混合制取水浸提液,选用大白菜种子作为毒性试验材料。在直径为 90 mm 的培养皿内放 1 张滤纸,加入 5 mL 堆肥浸提液,然后放入 20 粒种子(摆放均匀,便于观察),同时做清水对照。每处理设 3 重复。置于 21 ℃ 恒温培养箱中培养 72 h 后,观察记录各平皿中种子发芽数及根长,计算种子发芽势。种子发芽势 = 规定天数发芽的种子数 / 供试种子数 × 100%。当发芽势 > 80% 时,可认为堆肥已经腐熟^[13]。

1.4.6 数据处理 试验数据采用 Excel 进行统计,SPSS 软件进行方差分析,同时用 LSD 法对每因素各水平之间进行多重比较,并利用多目标综合平衡法进行综合分析^[14]。

2 结果与分析

2.1 玉米芯与畜禽粪便袋装堆料发酵过程中的温度变化特点

试验于 2011 年 3 月 20 日混料装袋,3 月 23 日开始测温,5 月 13 日堆肥完成。堆肥过程中,温度随时间的变化趋势见图 1。玉米芯与畜禽粪便混合堆肥过程中,料堆温度均高于环境温度。玉米芯与牛粪混合堆肥时(图 1 - a),处理 YXN 5 温度上升速度及高温持续时间明显优于其他试验处理,堆肥第 3 天升到 50 ℃ 以上,并且持续 20 d,以后温度迅速下降至 30 ℃ 左右并持续较长时间。玉米芯与鸡粪混合堆肥时(图 1 - b),处理 YXJ 3、YXJ 5 和 YXJ 7 的温度均于堆肥第 3 天升至 50 ℃ 以上,但 YXJ 3 和 YXJ 7 持续时间较短,仅 YJ 5 维持了 13 d,然后开始逐渐下降至室温并趋于稳定。玉米芯与猪粪混合堆肥时(图 1 - c),YXZ 5 和 YXZ 6 温度上升速度最快,于第 3 天达到 50 ℃,但 YXZ 6 持续时间太短,YXZ 5 持续了 20 d 左右;此外,YXZ 7 温度上升速度稍慢,第 5 天升至 50 ℃,但持续时间较长。

2.2 玉米芯与畜禽粪便袋装堆料配方筛选

在 50 d 的堆肥过程中,料堆经历升温、持温、降温 3 个阶段后,完成发酵,取样测定成分并进行种子发芽试验,计算 T 值、有机质下降率、全磷和全钾增长率及发芽势(表 4 至表 6)。

2.3 堆肥感官指标分析

从表 4 至表 6 可知,玉米芯与畜禽粪便经过 50 d 堆肥处理后,颜色、气味因试验处理不同而存在差异。部分堆肥颜色转变为黑褐色,部分为棕色;氨味和粪臭味均有所减弱,有的已完全消失。其中,YXN 5、YXJ 7、YXZ 7 为达到堆肥相关要求的最佳配方,处理 YXN 9、YXJ 3、YXJ 4、YXZ 4 的氨味和粪臭味还较重。

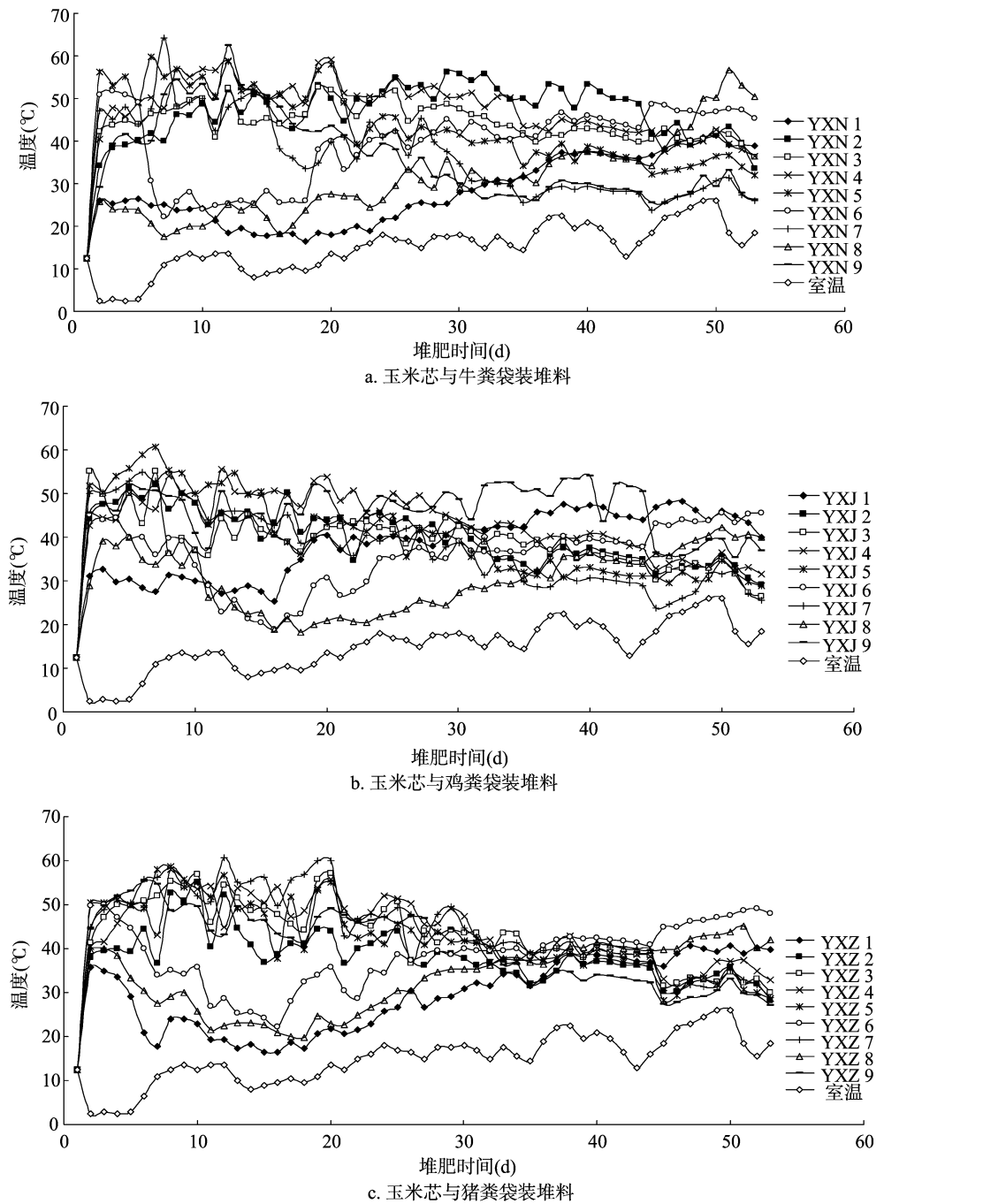


图1 玉米芯与畜禽粪便袋装堆料发酵过程中的温度变化

表 4 玉米芯与牛粪袋装堆肥 L₉(3⁴) 正交试验方案及结果

| 试验号 | 因素 | | | | 堆肥成品颜色、气味 | T 值 | 有机质下降率(%) | 全磷增长率(%) | 全钾增长率(%) | 大白菜发芽势(%) |
|-------|----|---|---|---|------------------|------|-----------|----------|----------|-----------|
| | A | B | C | D | | | | | | |
| YXN 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | (黑)褐色、略带氨味、略带粪臭味 | 0.23 | 10.54 | 618.2 | 3.8 | 90 |
| YXN 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.22 | 14.30 | 301.0 | 278.3 | 90 |
| YXN 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.49 | 12.10 | 76.1 | 259.6 | 90 |
| YXN 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.61 | 17.50 | 396.6 | 103.0 | 90 |
| YXN 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | (黑)褐色、无氨味、略带粪臭味 | 0.41 | 7.48 | 131.4 | 200.0 | 90 |
| YXN 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.13 | 15.83 | 628.4 | 136.2 | 90 |
| YXN 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.32 | 5.73 | 251.7 | 153.2 | 90 |
| YXN 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.29 | 9.21 | 206.7 | 148.6 | 95 |
| YXN 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 棕色、略带氨味、略带粪臭味 | 0.29 | 8.69 | 410.6 | 153.8 | 90 |

表 5 玉米芯与鸡粪袋装堆肥 L₉(3⁴) 正交试验方案及结果

| 试验号 | 因素 | | | | 堆肥成品颜色、气味 | T 值 | 有机质下降率(%) | 全磷增长率(%) | 全钾增长率(%) | 大白菜发芽势(%) |
|-------|----|---|---|---|------------------|------|-----------|----------|----------|-----------|
| | A | B | C | D | | | | | | |
| YXJ 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 棕色、略带氨味、略带粪臭味 | 0.59 | 14.85 | 1.0 | 208.5 | 95 |
| YXJ 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | (黑)褐色、无氨味、略带粪臭味 | 0.57 | 7.86 | 205.4 | 192.1 | 85 |
| YXJ 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | (黑)褐色、略带氨味、粪臭味严重 | 0.21 | 13.62 | 566.7 | 117.3 | 95 |
| YXJ 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | (黑)褐色、略带氨味、粪臭味严重 | 0.53 | 14.05 | 156.7 | 221.6 | 95 |
| YXJ 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | (黑)褐色、无氨味、略带粪臭味 | 0.43 | 6.79 | 265.1 | 124.7 | 95 |
| YXJ 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | (黑)褐色、氨味严重、无臭味 | 0.34 | 19.74 | 471.6 | 111.9 | 95 |
| YXJ 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | (黑)褐色、无氨味、无臭味 | 0.52 | 0.18 | 153.6 | 164.7 | 85 |
| YXJ 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 棕色、无氨味、粪臭味严重 | 0.52 | 19.23 | 117.8 | 122.2 | 90 |
| YXJ 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | (黑)褐色、无氨味、略带粪臭味 | 0.21 | 17.06 | 973.5 | 27.8 | 85 |

表 6 玉米芯与猪粪袋装堆肥 L₉(3⁴) 正交试验方案及结果

| 试验号 | 因素 | | | | 堆肥成品颜色、气味 | T 值 | 有机质下降率(%) | 全磷增长率(%) | 全钾增长率(%) | 大白菜发芽势(%) |
|-------|----|---|---|---|-----------------|------|-----------|----------|----------|-----------|
| | A | B | C | D | | | | | | |
| YXZ 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.56 | 2.58 | 236.6 | 150.2 | 90 |
| YXZ 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 棕色、略带氨味、略带粪臭味 | 0.53 | 8.69 | 64.4 | 70.3 | 95 |
| YXZ 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.25 | 15.67 | 363.8 | 124.6 | 90 |
| YXZ 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 棕色、略带氨味、粪臭味严重 | 0.44 | 6.26 | 32.2 | 186.1 | 90 |
| YXZ 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.48 | 3.59 | 99.8 | 186.0 | 95 |
| YXZ 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.36 | 7.73 | 247.6 | 120.2 | 90 |
| YXZ 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | (黑)褐色、无氨味、略带粪臭味 | 0.51 | 10.34 | 181.5 | 177.8 | 95 |
| YXZ 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.19 | 16.67 | 566.6 | 105.9 | 100 |
| YXZ 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 棕色、无氨味、略带粪臭味 | 0.24 | 6.01 | 404.1 | 253.9 | 90 |

2.4 堆肥前后 C/N 变化(T 值)

在整个堆肥过程中,全碳含量下降幅度较大,全氮含量有所增加,最终使得 C/N 下降。从表 4 至表 6 可以看出,当玉米芯与畜禽粪便完成 50 d 堆肥过程后,各试验处理的 T 值均在 0.72 以下,达到堆肥腐熟要求。

2.5 堆肥有机质的变化

在玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥过程中,由于微生物的活动,大量消耗有机质等营养元素,有机质以 CO₂ 的形式挥发,有机质含量呈下降趋势。对试验结果分别进行极差分析,结果见表 7。

由表 7 进行直观分析,玉米芯与牛粪袋装堆肥有机质下

降率极差的大小顺序为:R_A > R_D > R_B,得出影响有机质下降率的因素主次顺序为 C/N > 含水量 > 菌剂,各因素最优水平为 A₂B₃D₃,即 C/N(25 ~ 35) : 1,添加 Bio 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与鸡粪袋装堆肥有机质下降率极差的大小顺序为:R_B > R_D > R_A,得出影响其有机质下降率的因素主次顺序为菌剂 > 含水量 > C/N,各因素最优水平为 A₂B₃D₃,即 C/N(25 ~ 35) : 1,添加 Bio 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与猪粪袋装堆肥有机质下降率极差的大小顺序为:R_D > R_A > R_B,得出影响有机质下降率的因素主次顺序为含水量 > C/N > 菌剂,各因素最优水平为 A₃B₃D₃,即 C/N(35 ~ 40) : 1,添加 Bio 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。

表 7 玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥发酵 L₉(3⁴) 正交试验结果与极差分析(有机质下降率)

| k _{ij} | 玉米芯与牛粪堆肥有机质下降率(%) | | | 玉米芯与鸡粪堆肥有机质下降率(%) | | | 玉米芯与猪粪堆肥有机质下降率(%) | | |
|-----------------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------------------|-------|--------|
| | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 |
| k ₁ | 12.313 | 11.257 | 8.903 | 12.110 | 9.693 | 12.900 | 8.980 | 6.393 | 4.060 |
| k ₂ | 13.603 | 10.330 | 11.953 | 13.527 | 11.293 | 9.260 | 5.860 | 9.650 | 8.920 |
| k ₃ | 7.877 | 12.207 | 13.937 | 12.157 | 16.807 | 15.633 | 11.007 | 9.803 | 12.867 |
| R | 5.726 | 1.877 | 4.034 | 1.417 | 7.114 | 6.373 | 5.147 | 3.410 | 8.807 |

注:k₁、k₂、k₃ 分别为各因素水平 1、水平 2、水平 3 的均值,R 为极差。下同。

为进一步反映各因子之间的差异,对试验结果进行了方差分析,结果见表 8。

由表 8 可知,玉米芯与牛粪袋装堆肥时,C/N 对有机质下降率的影响最大,其次为含水量,二者均达到极显著水平,菌剂的作用不显著;玉米芯与鸡粪袋装堆肥时,菌剂对有机质下降率的影响最大,达到了显著水平,C/N 和含水量的作用不显著,各因素影响显著性依次为菌剂 > 含水量 > C/N;玉米芯与猪粪袋装堆肥时,含水量对有机质下降率的影响最大,C/N、菌剂和含水量的作用都达到极显著水平,各因素影响显

著性依次为含水量 > C/N > 菌剂。方差分析与直观分析的结果一致。

2.6 堆肥营养成分变化

由表 4 至表 6 可知,玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥后,全磷和全钾的含量都呈上升趋势。试验中,玉米芯与牛粪、鸡粪、猪粪堆肥时,最大全钾增长率分别为 278.3%、221.6%、253.9%;最大全磷增长率分别为 628.4%、973.5%、566.6%。对试验结果分别进行极差分析,结果见表 9 至表 11。

由表 9 至表 11 进行直观分析,玉米芯与牛粪袋装堆肥全

表 8 玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥发酵 L₉ (3⁴) 正交试验结果的方差分析 (有机质下降率)

| 变异来源 | 玉米芯与牛粪堆肥有机质下降率 (%) | | | | 玉米芯与鸡粪堆肥有机质下降率 (%) | | | | 玉米芯与猪粪堆肥有机质下降率 (%) | | | |
|------|--------------------|----------|---------|----------|--------------------|----------|---------|--------|--------------------|----------|---------|----------|
| | 离均平方和 (SS) | 自由度 (df) | 方差 (MS) | F | 离均平方和 (SS) | 自由度 (df) | 方差 (MS) | F | 离均平方和 (SS) | 自由度 (df) | 方差 (MS) | F |
| A | 162.030 | 2 | 81.013 | 13.52 ** | 12.133 | 2 | 6.066 | 0.19 | 121.790 | 2 | 60.893 | 30.30 ** |
| B | 15.814 | 2 | 7.907 | 1.32 | 235.510 | 2 | 117.760 | 3.64 * | 64.453 | 2 | 32.226 | 16.04 ** |
| D | 80.110 | 2 | 40.057 | 6.69 ** | 143.590 | 2 | 71.795 | 2.22 | 345.95 | 2 | 172.977 | 86.07 ** |
| 误差 | 119.790 | 20 | 5.990 | | 646.780 | 20 | 32.339 | | 40.194 | 20 | 2.010 | |
| 总变异 | 3 797.000 | 27 | | | 5 608.300 | 27 | | | 2 584.500 | 27 | | |

注:“ ** ”代表极显著水平;“ * ”代表显著水平。下同。

磷增长率极差的大小顺序为 $R_B > R_D > R_A$, 影响全磷增长率的因素主次顺序为菌剂 > 含水量 > C/N, 各因素最优水平为 A₂B₁D₂, 即 C/N (25 ~ 35) : 1, 不加菌剂, 含水量为 40% ~ 55%; 全钾增长率极差的大小顺序为 $R_B > R_D > R_A$, 影响全钾增长率的因素主次顺序为菌剂 > 含水量 > C/N, 各因素最优水平为 A₁B₂D₂, 即 C/N (20 ~ 25) : 1, 添加 VT - 1000 菌剂, 含水量为 40% ~ 55%。玉米芯与鸡粪袋装堆肥全磷增长率极差的大小顺序为 $R_B > R_A > R_D$, 影响全磷增长率的因素主次顺序为菌剂 > C/N > 含水量, 各因素最优水平为 A₃B₃D₁, 即 C/N (35 ~ 40) : 1, 添加 Bio 菌剂, 含水量为 30% ~ 40%; 全钾增长率极差的大小顺序为 $R_B > R_A > R_D$, 影响全钾增长率的因素主次顺序为菌剂 > C/N > 含水量, 各因素最优水平为 A₁B₁D₂, 即 C/N (35 ~ 40) : 1, 不加菌剂, 含水量为 40% ~ 55%。玉米芯与猪粪袋装堆肥全磷增长率极差的大小顺序为 $R_A > R_B > R_D$, 影响全磷增长率的因素主次顺序为 C/N > 菌剂 > 含水量, 各因素最优水平为 A₃B₃D₃, 即 C/N (35 ~ 40) : 1, 添加 Bio 菌剂, 含水量为 55% ~ 65%; 全钾增长率极差的大小顺序为 $R_D > R_A > R_B$, 影响全钾增长率的因素主次顺序为含水量 > C/N > 菌剂, 各因素最优水平为 A₃B₁D₁, 即 C/N (35 ~ 40) : 1, 不加菌剂, 含水量为 30% ~ 40%。

为进一步反映各因子之间的差异, 对试验结果进行了方差分析, 结果见表 12 至表 14。

由表 12 至表 14 可知, 玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵时, 菌剂对全磷增长率的影响最大, 达到显著水平, C/N 和含水量的作用不明显, 各因素影响显著性依次为菌剂 > 含水量 > C/N; 菌剂对全钾增长率的影响最大, 达到极显著水平, 含水量达到显著水平, C/N 作用不明显。玉米芯与鸡粪袋装堆肥发酵时, 菌剂对全磷增长率的影响最大, 达到了极显著水平, C/N 和含水量作用不显著, 各因素影响显著性依次为菌剂 > C/N > 含水量; 菌剂对全钾增长率的影响最大, C/N、菌剂、含水量均达到了极显著水平, 各因素影响显著性依次为菌剂 >

表 12 玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵 L₉ (3⁴) 正交试验结果的方差分析 (全磷与全钾)

| 变异来源 | 全磷增长率 (%) | | | | 全钾增长率 (%) | | | |
|------|--------------|----------|-------------|---------|-------------|----------|------------|-----------|
| | 离均平方和 (SS) | 自由度 (df) | 方差 (MS) | F | 离均平方和 (SS) | 自由度 (df) | 方差 (MS) | F |
| A | 161 066.186 | 2 | 80 533.093 | 3.161 | 6 078.492 | 2 | 3 039.246 | 1.061 |
| B | 21 4652.536 | 2 | 107 326.268 | 4.212 * | 74 859.183 | 2 | 37 429.591 | 13.061 ** |
| D | 41 465.338 | 2 | 20 732.669 | 0.814 | 23 644.565 | 2 | 11 822.283 | 4.125 * |
| 误差 | 509 586.294 | 20 | 25 479.315 | | 57 316.036 | 20 | 2 865.802 | |
| 总变异 | 396 6937.240 | 27 | | | 849 391.260 | 27 | | |

2.7 堆肥产物毒性检测

从表 4 至表 6 可知, 玉米芯与畜禽粪便堆肥发酵各试验

表 9 玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵 L₉ (3⁴) 正交试验结果与极差分析 (全磷和全钾)

| k_{ij} | 全磷增长率 (%) | | | 全钾增长率 (%) | | |
|----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 |
| k_1 | 331.767 | 422.167 | 386.733 | 180.567 | 86.667 | 119.200 |
| k_2 | 385.467 | 213.033 | 393.700 | 146.400 | 208.967 | 189.233 |
| k_3 | 289.667 | 371.700 | 226.467 | 151.867 | 183.200 | 170.400 |
| R | 95.800 | 209.134 | 167.233 | 34.167 | 122.300 | 70.033 |

表 10 玉米芯与鸡粪袋装堆肥发酵 L₉ (3⁴) 正交试验结果与极差分析 (全磷和全钾)

| k_{ij} | 全磷增长率 (%) | | | 全钾增长率 (%) | | |
|----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|---------|
| | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 |
| k_1 | 257.700 | 103.7667 | 413.200 | 172.633 | 198.267 | 120.333 |
| k_2 | 297.800 | 196.100 | 276.876 | 152.733 | 146.333 | 156.233 |
| k_3 | 414.967 | 670.600 | 280.400 | 104.900 | 85.667 | 153.700 |
| R | 157.267 | 566.833 | 136.333 | 67.733 | 112.600 | 35.900 |

表 11 玉米芯与猪粪袋装堆肥发酵 L₉ (3⁴) 正交试验结果与极差分析 (全磷和全钾)

| K_{ij} | 全磷增长率 (%) | | | 全钾增长率 (%) | | |
|----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 |
| k_1 | 221.600 | 150.100 | 246.833 | 115.033 | 171.367 | 196.700 |
| k_2 | 126.533 | 243.600 | 164.500 | 164.100 | 120.733 | 122.767 |
| k_3 | 384.067 | 338.500 | 320.867 | 179.200 | 166.233 | 138.867 |
| R | 257.534 | 188.400 | 156.367 | 64.167 | 50.634 | 73.933 |

C/N > 含水量; 玉米芯与猪粪袋装堆肥发酵时, C/N 对全磷增长率的影响最大, C/N、菌剂和含水量高的作用均达到极显著水平, 各因素影响显著性依次为 C/N > 菌剂 > 含水量, 含水量对全钾增长率的影响最大, C/N、菌剂和含水量的作用均达到极显著水平, 各因素影响显著性依次为含水量 > C/N > 菌剂。方差分析与直观分析的结果一致。

处理的浸提液种子发芽势均 $\geq 80\%$, 达到了腐熟要求。对试验结果分别进行极差分析, 结果见表 15。

表 13 玉米芯与鸡粪袋装堆肥发酵 L₉(3⁴) 正交试验结果的方差分析(全磷与全钾)

| 变异来源 | 全磷增长率(%) | | | | 全钾增长率(%) | | | |
|------|---------------|---------|-------------|----------|-------------|---------|------------|-----------|
| | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F |
| A | 444.389 | 2 | 222.194 | 0.083 | 26 310.027 | 2 | 13 155.014 | 73.087 ** |
| B | 869 919.909 | 2 | 434 959.950 | 162.3 ** | 38 584.183 | 2 | 19 292.091 | 107.80 ** |
| D | 10 352.347 | 2 | 5 176.173 | 1.931 | 3 468.027 | 2 | 1 734.014 | 9.634 ** |
| 误差 | 53 598.076 | 20 | 2 679.900 | | 3 599.805 | 20 | 179.990 | |
| 总变异 | 3 246 966.720 | 27 | | | 585 874.080 | 27 | | |

表 14 玉米芯与猪粪袋装堆肥发酵 L₉(3⁴) 正交试验结果的方差分析(全磷与全钾)

| 变异来源 | 全磷增长率(%) | | | | 全钾增长率(%) | | | |
|------|--------------|---------|------------|-----------|-------------|---------|------------|-----------|
| | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F |
| A | 300 294.53 | 2 | 150 147.26 | 18.589 ** | 19 631.347 | 2 | 9 815.674 | 37.498 ** |
| B | 157 591.81 | 2 | 78 795.903 | 9.755 ** | 14 282.925 | 2 | 7 141.463 | 27.282 ** |
| D | 108 980.10 | 2 | 54 490.030 | 6.746 ** | 36 178.872 | 2 | 18 089.436 | 69.106 ** |
| 误差 | 161 543.61 | 20 | 8 077.180 | | 5 235.301 | 20 | 261.765 | |
| 总变异 | 2 340 423.60 | 27 | | | 743 743.380 | 27 | | |

由表 15 进行直观分析,玉米芯与牛粪袋装堆肥种子发芽势极差的大小顺序为 R_B = R_A = R_D,影响大白菜种子发芽势的因素主次顺序均等,各因素最优水平为 A₃B₂D₃,即 C/N(35 ~ 40) : 1,添加 VT-1000 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与鸡粪袋装堆肥种子发芽势极差的大小顺序为 R_A > R_D > R_B,影响大白菜种子发芽势的因素主次顺序为 C/N > 含水

量 > 菌剂,各因素最优水平为 A₂B₃D₃,即 C/N(25 ~ 35) : 1,添加 Bio 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与猪粪袋装堆肥种子发芽势极差的大小顺序为 R_B > R_A > R_D,影响大白菜种子发芽势的因素主次顺序为菌剂 > C/N > 含水量,各因素最优水平为 A₃B₂D₃,即 C/N(35 ~ 40) : 1,添加 VT-1000 菌剂,含水量为 55% ~ 65%。

表 15 玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥发酵 L₉(3⁴) 正交试验结果与直观分析(种子发芽势)

| k _{ij} | 玉米芯与牛粪堆肥种子发芽势(%) | | | 玉米芯与鸡粪堆肥种子发芽势(%) | | | 玉米芯与猪粪堆肥种子发芽势(%) | | |
|-----------------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 | C/N | 菌剂 | 含水量 |
| k ₁ | 90.000 | 90.000 | 90.000 | 91.667 | 91.667 | 91.667 | 91.667 | 91.667 | 91.667 |
| k ₂ | 90.000 | 91.667 | 90.000 | 95.000 | 90.000 | 88.333 | 91.667 | 96.667 | 93.333 |
| k ₃ | 91.667 | 90.000 | 91.667 | 86.667 | 91.667 | 93.333 | 95.000 | 90.000 | 93.333 |
| R | 1.667 | 1.667 | 1.667 | 8.333 | 1.667 | 5.000 | 3.333 | 6.667 | 1.666 |

为进一步反映各因子之间的差异,对试验结果进行了方差分析,结果见表 16。

由表 16 可知,玉米芯与牛粪袋装堆肥时,菌剂对种子发芽势的影响最大,C/N、菌剂和含水量均达到极显著水平,各因素影响显著性依次为菌剂 > 含水量 > C/N。玉米芯与鸡粪

袋装堆肥时,C/N 对种子发芽势的影响最大,其次为含水量,二者的作用都达到极显著水平高,菌剂的作用不显著。玉米芯与猪粪袋装堆肥时,菌剂对种子发芽势的影响最大,C/N、菌剂和含水量均达到极显著水平,各因素影响显著性依次为菌剂 > C/N > 含水量。方差分析与直观分析的结果一致。

表 16 玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥发酵 L₉(3⁴) 正交试验结果的方差分析(种子发芽势)

| 变异来源 | 玉米芯与牛粪堆肥种子发芽势(%) | | | | 玉米芯与鸡粪堆肥种子发芽势(%) | | | | 玉米芯与猪粪堆肥种子发芽势(%) | | | |
|------|------------------|---------|--------|---------|------------------|---------|--------|-----------|------------------|---------|---------|----------|
| | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F | 离均平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS) | F |
| A | 13.557 | 2 | 6.778 | 7.72 ** | 316.667 | 2 | 158.33 | 27.143 ** | 66.667 | 2 | 33.333 | 40.00 ** |
| B | 16.889 | 2 | 8.444 | 9.62 ** | 16.667 | 2 | 8.333 | 1.429 | 216.67 | 2 | 108.330 | 130.0 ** |
| D | 16.667 | 2 | 8.333 | 9.49 ** | 116.667 | 2 | 58.333 | 10.000 ** | 16.667 | 2 | 8.333 | 10.00 ** |
| 误差 | 17.556 | 20 | 0.878 | | 116.667 | 20 | 5.833 | | 16.667 | 20 | 0.833 | |
| 总变异 | 221 473.000 | 27 | | | 224 700.000 | 27 | | | 232 725.000 | 27 | | |

2.8 综合平衡法确定最优发酵配方

采用综合平衡法对试验结果进行分析,确定最终的最优水平组合。从因素影响趋势及因素主次关系(表 17)可知,玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵时,因素 B 对全磷增长率、全钾增长率的影响均最大,且对种子发芽势的影响居次要地位,应首先进行分析;因素 A 对有机质下降率和种子发芽势影响均最

大,但对全磷和全钾增长率作用不显著,应次要分析;最后是因素 D,综合分析各因素对发酵效果的影响顺序为 B > A > D。按照综合平衡法分析的原则得出,最优水平组合为 A₂B₂D₂,即 C/N 为(25 ~ 35) : 1,添加 VT-1000 发酵菌剂,含水量为 40% ~ 55%。玉米芯与鸡粪袋装堆肥发酵时,因素 B 对有机质下降率、全磷增长率、全钾增长率的影响均最大,

应首先进行分析;因素 A 对种子发芽势的影响最大,且对全磷和全钾增长率的影响仅次于 B,应次要分析,综合分析各因素对发酵效果的影响顺序为 B > A > D。按照综合平衡法分析的原则得出,最优水平组合为 A₂B₃D₃,即 C/N 为 (25 ~ 35) : 1,添加 Bio 发酵菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与猪粪袋装堆肥发酵时,因素 A 对全磷增长率的影响最大,且

对有机质下降率、全钾增长率和种子发芽势的影响占次要地位,应首先分析;因素 D 对有机质下降率和全钾增长率的影响最大,次要分析,综合分析各因素对发酵效果的影响顺序为 A > D > B。按照综合平衡法分析的原则得出,最优水平组合为 A₃B₃D₃,即 C/N 为 (35 ~ 40) : 1,添加 VT - 1000 发酵菌剂,含水量为 55% ~ 65%。

表 17 堆肥发酵试验因素主次与最优水平

| 试验指标 | 玉米芯与牛粪堆肥 | | | | 玉米芯与鸡粪堆肥 | | | | 玉米芯与猪粪堆肥 | | | |
|--------|----------|---|------|--|----------|---|------|--|----------|---|------|--|
| | 因素主次 | | 最优水平 | | 因素主次 | | 最优水平 | | 因素主次 | | 最优水平 | |
| 有机质下降率 | A | D | B | A ₂ D ₃ B ₃ | B | D | A | B ₃ D ₃ A ₂ | D | A | B | D ₃ A ₃ B ₃ |
| 全磷增长率 | B | D | A | B ₁ D ₂ A ₂ | B | A | D | B ₃ A ₃ D ₁ | A | B | D | A ₃ B ₃ D ₃ |
| 全钾增长率 | B | D | A | B ₂ D ₂ A ₁ | B | A | D | B ₁ A ₁ D ₂ | D | A | B | D ₁ A ₃ B ₁ |
| 种子发芽势 | A | B | D | A ₃ B ₂ D ₃ | A | D | B | A ₂ D ₃ B ₃ | B | A | D | B ₂ A ₃ D ₃ |
| 温度 | A | B | D | A ₂ B ₂ D ₂ | A | B | D | A ₂ B ₂ D ₂ | A | B | D | A ₂ B ₂ D ₂ |
| T 值 | A | B | D | A ₁ B ₃ D ₃ | A | B | D | A ₃ B ₃ D ₂ | A | B | D | A ₃ B ₁ D ₂ |

注:对温度和 T 值,3 因素平行。

由上述可知,微生物发酵菌剂在玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥过程中具有明显的促进用作,且添加菌剂的堆肥品质明显优于不添加菌剂发酵的堆肥。其中,VT - 1000 菌剂对玉米芯和牛粪袋装堆肥加速发酵进程的作用最佳,Bio 菌剂对玉米芯与鸡粪、猪粪袋装堆肥的效果最佳。

3 结论与讨论

玉米芯与畜禽粪便袋装堆肥时,经历相同时间(50 d)的堆料发酵,其堆肥毒性均达到了堆肥腐熟度的要求。玉米芯与牛粪袋装堆肥发酵时,最优水平组合为 A₂B₂D₂,即 C/N 为 (25 ~ 35) : 1,添加 VT - 1000 发酵菌剂,含水量为 40% ~ 55%。玉米芯与鸡粪袋装堆肥发酵,最优水平组合为 A₂B₃D₃,即 C/N 为 (25 ~ 35) : 1,添加 Bio 发酵菌剂,含水量为 55% ~ 65%。玉米芯与猪粪袋装堆肥发酵,最优水平组合为 A₃B₃D₃,即 C/N 为 (35 ~ 40) : 1,添加 VT - 1000 发酵菌剂,含水量为 55% ~ 65%。虽然堆肥发酵结束后的有机质含量略有下降,但全磷和全钾含量均有所增加,堆肥毒性降低,且达到了堆肥腐熟度的要求。

本研究整个堆肥过程中,堆体温度均高于环境温度,但部分堆温未达到高温好氧发酵所要求的温度,而这些处理的其他指标表明都腐熟了,这与所用的温度计有一定的关系,后续研究表明数显温度计测定的数值比实际温度要低 2 ~ 3 ℃。堆肥过程中未进行翻堆处理,部分透气不佳,引起部分厌氧发酵,也会影响温度上升。同时,堆肥原料少,产生热量少,易导致温度上不来。对堆肥过程中温度变化过程及机理,有待进一步研究。

玉米芯与畜禽粪便经过 50 d 袋装堆肥处理后,堆肥颜色大部分转变为黑褐色,其余为棕色;氨味和粪臭味均有所减弱,有的已完全消失。部分处理在感官质量方面相对较差,氨味和粪臭味还较重,这可能是因为在堆肥过程中,存在部分厌氧发酵而产生恶臭物质,由于未进行翻堆,臭气不易排出而导致氨味和粪臭味的积累。部分试验处理的 T 值未达到腐熟标准,可能是由于堆肥过程中氮素损失较多而引起 T 值偏高,影响堆肥效果。

本试验采用直接袋装堆肥,简单经济,占地面积少,并且

堆肥产物能达到堆肥腐熟度的要求。与传统堆肥相比,本研究结果实现了堆肥化处理的小规模应用,适合对少量废弃物进行发酵,为农户处理自家的玉米芯和畜禽粪便提供了一定的技术依据。

参考文献:

[1] 黄 茜,黄凤洪,江木兰,等. 多菌种混合发酵转化秸秆技术的研究及应用进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(增刊):180 - 183.

[2] 王晓燕,黄光群,韩鲁佳. 鸡粪工厂化堆肥过程中有机质含量预测模型[J]. 农业机械学报,2010,41(1):101 - 105.

[3] 黄国锋,吴启堂,黄焕忠. 有机固体废弃物好氧高温堆肥化处理技术[J]. 中国生态农业学报,2003,11(1):159 - 161.

[4] 陈志宇,苏继影,栾冬梅. 猪粪好氧堆肥的影响因素[J]. 畜牧与兽医,2005,37(7):53 - 54.

[5] 文国来,王德汉,李俊飞,等. 处理农村生活垃圾装置的研制及工艺[J]. 农业工程学报,2011,27(6):283 - 287.

[6] 潘 飞,曾庆福,陈 悟,等. 啤酒厂污泥与棉籽饼袋式堆肥及效果[J]. 农业工程学报,2010,26(1):309 - 312.

[7] 黄燕翔,江胜滔. 棚式袋装发酵法生产有机肥技术研究初报[J]. 中国土壤与肥料,2009(3):67 - 70.

[8] Golueke C G. Principles of biological resource recovery[J]. Biocycle,1981,22:36 - 40.

[9] Morel J L,Colin F,Germon J C,et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[M]. London&New York: Elsevier Applied Science Publish,1985:56 - 72.

[10] Itavaara M,Vikman M,Venelampi O. Windrow composting of biodegradable packaging materials[J]. Compost Science & Utilization, 1997,5(2):84 - 92.

[11] Vuorinen A H,Saharinen M H. Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co - composting in a drum composting system[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,1997,66:19 - 23.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

[13] Zucconi F,Forte M,Monac A,et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. Biocycle,1981,22:27 - 29.

[14] 林 权. 基于综合平衡法的注塑工艺参数多目标优化设计[J]. 塑料科技,2011,39(1):84 - 88.