

面向牛粪与核桃果枝的遥控自走式翻堆机发酵工艺优化

马娟^{1,2} 冯斌² 王超³ 李浩² 于秀针² 王红英¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091;
3. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对牛粪好氧发酵生产生物有机肥过程中, 由于工艺参数不当造成的发酵周期长、肥料质量差及秸秆资源短缺等问题, 以牛粪和核桃果枝为原料, 以 C/N 比、菌剂类型、翻堆间隔时间为试验因素, 以发芽指数、有机质质量分数、总养分质量分数为试验指标, 在大量单因素试验的基础上, 选取较优的水平开展多因素正交试验, 确定了最优工艺组合。试验结果表明, 当 C/N 比为 25, 菌剂选用菌剂 2, 翻堆间隔时间为 4 d 时, 牛粪好氧发酵的升温速度快, 高温维持时间长, 发酵周期短, 发酵所得的生物有机肥产品的腐熟度高, 有效活菌数 (cfu) 达到 2×10^8 个/g, 总养分质量分数为 14.86%, 发芽指数可达 96.6%。

关键词: 牛粪; 核桃果枝; 条垛式发酵; 有机肥; 参数优化

中图分类号: S817.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)S0-0442-07

Optimization of Parameters for Organic Fertilizer Production from Cow Dung and Walnut Twigs by Remote Control Self-propelled Tilting Machine

MA Juan^{1,2} FENG Bin² WANG Chao³ LI Hao² YU Xiuzhen² WANG Hongying¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China
3. College of Mechanical and Electrical, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830091, China)

Abstract: In view of the cow dung in the process of aerobic fermentation production of biological organic fertilizer, due to improper parameters of the fermentation cycle is long, the poor quality of fertilizer, and fruit branch waste recycling use difficult problems. Cow dung and walnut twigs were used as raw materials, carbon-nitrogen ratio, fungicide and the number of days between turns were taken as the experimental factors, germination index, organic matter content and total nutrient content were used as test indexes. On the basis of a large number of single factor tests, selecting the optimal level of multi-factor orthogonal test, the optimal combination process was determined. Test results showed that when the carbon nitrogen ratio was 25, inoculants bacteria agent B, the number of days between turns were 4 days, aerobic fermentation of cow manure heated up quickly, high temperature maintenance time was long, fermentation cycle was short, the organic fertilizer produced by fermentation had a high degree of maturity fermentation biological. The effective viable count (cfu) was 2×10^8 per gram, the total nutrient content was 14.86%, and the germination index was 96.6%. The results can provide the necessary theoretical basis for the large-scale treatment of cow dung and the resource utilization of walnut twigs.

Key words: cow dung; walnut twigs; batten fermentation; organic fertilizer; parameters optimization

0 引言

近年来,随着养殖业向规模化、集约化发展,与

传统散养方式相比,规模化养殖方式在利用规模经济提升生产效益的同时,也造成了养殖废弃物的大量集中,而养殖废弃物处理不当将会给周边环境

收稿日期: 2021-07-05 修回日期: 2021-09-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费项目 (KY2020107、KY2021117)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-37) 和新疆维吾尔自治区自然科学基金计划特培项目 (2018D03008)

作者简介: 马娟(1984—),女,博士生,新疆农业科学院高级工程师,主要从事养殖粪污资源化处理装备与技术研究,E-mail: majuan186@163.com

通信作者: 王红英(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事设施养殖装备与技术研究,E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

境和居民健康带来巨大的危害,尤其对空气、水源、土壤等造成很大的污染^[1]。采用发酵技术处理畜禽粪便,既可以获得有机肥,实现种养循环,又能解决畜禽粪便污染环境的问题,实现养殖废弃物的资源化利用。

目前,常见的畜禽粪便好氧发酵方式主要有4种:利用高温密闭发酵罐^[2]或者纳米膜发酵堆肥机^[3]等设备进行的高温密闭式发酵;利用自走式翻堆机进行的条垛式发酵;采用槽式翻堆机进行的槽式发酵;传统的自然堆肥发酵。高温密闭式发酵工艺参数研究大多停留在试验设计或中试阶段^[4];槽式发酵生产能力较大,适合大型养殖场^[5];传统的自然堆肥发酵存在发酵周期长、发酵产品肥效低等问题^[6]。条垛式发酵由于设备投资小,设备操作简单、稳定性较好、发酵效率高,适合适度规模的养殖方式等特点在我国得到广泛的应用^[7]。近年来,国内外一些学者对牛粪条垛式发酵工艺进行了相关研究^[8-10],但都集中在牛粪条垛式发酵生产有机肥方面,针对牛粪添加复合微生物菌剂生产生物有机肥的研究较少。另外,以往研究将谷物的秸秆作为辅料,以林果果枝作为辅料开展牛粪生物有机肥工艺研究未见报道。

在西北和东北地区,通过制粒、粉碎等饲草料加工技术实现秸秆饲料化应用,造成牛粪发酵辅料短缺。林果业在我国农业生产中占据重要的位置,但果园残枝利用一直是困扰果农的一项难题^[11]。牛粪发酵时添加辅料不仅有利于调整 C/N 比,也有利于降低含水率,从而提高发酵效率^[12]。

针对以上现状,本文以牛粪和核桃果枝为原料,以牛粪和核桃果枝混合条垛式发酵工厂化生产生物有机肥为目标,以 C/N 比、菌剂类型、翻堆间隔时间为试验因素,以发芽指数、有机质质量分数、总养分质量分数为试验指标,在大量单因素试验的基础上,选取较优水平开展多因素正交试验,对发酵过程中的主要工艺参数进行优化,探讨最优发酵工艺条件,以期对牛粪和林果果枝废弃物的资源化处理,提供工艺参数和理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 原料

牛粪取自乌鲁木齐市烽火台镇西山农场设施养殖试验基地,核桃果枝于西山农场购买,将果枝颗粒长度粉碎至小于 2 cm,用于调节发酵初始的 C/N 比。牛粪和核桃果枝的主要理化性质如表 1 所示。

表 1 原料的主要理化性质
Tab.1 Main physical and chemical characteristics of compost material

原料	含水率/%	有机质质量分数/%	pH 值	C/N 比
牛粪	70	63.5	8.1	18.7
核桃果枝	38	46.8	6.2	75.5

1.1.2 菌剂制备

菌剂为新疆农业科学院微生物应用研究所研发的牛粪腐熟专用菌剂 1 和菌剂 2。两种菌剂都是先通过牛场、肥堆等不同生境分离、筛选,得到芽孢杆菌、酵母菌、乳酸菌等功能菌株 10 余株,然后经过发酵工艺优化结合牛粪腐熟试验,最终确定菌剂种类及配伍。菌剂 1 是由酿酒酵母菌、甲基营养型芽孢杆菌、简单芽孢杆菌 3 株菌组合而成的复合活性菌剂。菌剂 2 是由甲基营养型芽孢杆菌、嗜热脱氮芽孢杆菌、乳酸乳球菌 3 株菌组合而成的复合活性菌剂。

1.1.3 试验设备

核桃果枝粉碎机为新疆农业科学院农业机械化研究所研发的 9FS-200 型林果枝粉碎机^[13],其结构见图 1,由机架、进料斗、出料口、连接管、粉碎腔、粉碎刀辊、三点悬挂机构、传动机构组成。

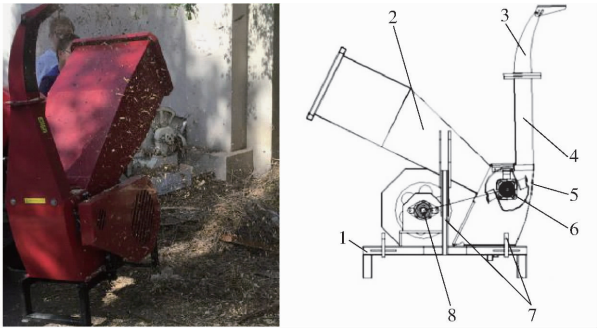


图 1 9FS-200 型林果枝粉碎机

Fig.1 Structure of 9FS-200 fruit tree branch shredder
1. 机架 2. 进料斗 3. 出料口 4. 连接管 5. 粉碎腔 6. 粉碎刀辊 7. 三点悬挂机构 8. 传动机构

工作时,9FS-200 型林果枝粉碎机通过三点悬挂机构与拖拉机连接,传动机构从拖拉机获得动力后经变速带轮带动粉碎刀辊高速旋转,当物料通过进料口进入粉碎腔后被高速旋转的粉碎刀辊切削粉碎,切削过程中,粉碎刀辊不断将进料斗中的林果枝带入粉碎腔,实现连续切削,粉碎后的林果枝在粉碎刀辊高速转动离心力以及高速旋转形成的流场风力的作用下抛出出料口。

条垛式翻堆机采用新疆农业科学院农业机械化研究所自主研发的遥控自走式翻堆机^[14],其结构见图 2,由机架框架、电机、主轴、主轴传动链条、行走传动杆、拨杆、带轮、蜗轮蜗杆减速器、行走传动链

条、左右侧千斤压顶、横向移动链条、左右侧横向移动轮、前进轮组成。其工作原理为:当直行翻抛时,第一电机带动主轴和拨杆转动,同时,第二电机通过带轮、蜗轮蜗杆减速器带动前进轮行走,完成直行翻抛。当完成直行翻抛作业,需要横向移动翻堆机换条垛时,通过左右侧千斤压顶提高左右侧前进轮,压下左右侧横向移动轮,使其作为工作轮,同时关闭第一电机,开启第三电机,第三电机带动横向移动轮行走,完成条垛间的转换。



图 2 遥控自走式翻堆机

Fig. 2 Structure of smart turning machine

1.2 试验因素及试验指标

影响牛粪发酵的主要因素包括含水率、C/N 比、温度、通风供氧时间、有机质接种量等。王亮等^[15]通过实验室小规模试验和规模化生产试验,发现最佳规模化生产工艺参数为:物料含水率 65%, C/N 比 30, 菌剂接种量 2.5 L/m³, 翻堆间隔时间和强制通风时间为 3 d 和 30 min; NY/T 3442—2019《畜禽粪便堆肥技术规范》中约定的最佳原料初始条件为:含水率 60%~65%, C/N 比 25~35; 曹慧玲等^[16]开展槽式好氧发酵牛粪生产生物肥料的工艺优化研究,结果表明:一次发酵的最优工艺参数为原料含水率 65%, C/N 比 30, 菌剂接种量 0.35%, 翻堆次数 4 d 一次。通过以上研究可以看出,对牛粪好氧发酵原料最佳初始含水率的结论基本一致,均为 60%~65%,为此,本次试验原料初始含水率均采用 65%。目前,大部分牛粪好氧发酵工艺优化研究均使用谷物秸秆来调整 C/N 比^[17-22],如玉米秸秆或者小麦秸秆等,但由于新疆地区特别是南疆地区畜牧养殖饲草料缺乏,谷物秸秆是珍贵的饲料来源,不能作为堆肥添加原料。核桃是新疆特色林果作物,2018 年,新疆核桃种植面积 3.91 × 10⁵ hm²,产量 8.37 × 10⁵ t^[23]。条垛式发酵温度和通风供氧时间主要与翻堆间隔时间有关,本试验将翻堆间隔时间作为试验因素之一,首先进行大量的单因素试验,之后排除效果不好的几个水平,最终确定较优的几个翻堆间隔时间为该因素水平开展正交试验。有机质接种量与所用菌剂类型息息相关,目前,市场上菌剂种类较多,以畜禽粪污通用性菌剂为主,本试验将新疆农业科学院微生物应用研究所研制的牛粪好氧发酵专用菌剂作为试验因素之一,开展菌剂 1、菌剂

2 以及不用菌剂 3 水平试验。

1.3 测定项目和方法

在小规模发酵参数优化的基础上,进行规模化发酵验证其可靠性和各种参数动态变化与发酵结果,最终得到菌剂、C/N 比、翻抛次数对牛粪发酵腐熟的影响规律和优化参数,并进行各因素相关性分析。

规模化发酵试验在乌鲁木齐市烽火台镇西山农场发酵车间进行。牛粪条垛长、宽、高分别为 50、2.5、1 m。采用遥控自走式翻堆机进行翻堆。初始温度在规模化生产中不予考虑。

1.3.1 温度测定

温度采用杭州路格科技有限公司的 L92-1 型温度记录仪采集并记录温度变化,每个试验单元选择 6 个采样点,分别是条垛中间和角落两个位置高度(从上到下)为 0.3、0.6、0.9 m 处。同时用 1 m 长水银温度计不定时检测采样点温度,以检测温度记录仪记录温度准确性。发酵过程中,温度在 50~55℃ 保持 5~7 d,才能达到无害化卫生指标。在堆粪场、发酵车间安装水银温度计测定环境温度变化。

1.3.2 含水率测定

取样 100 g,用奥豪斯仪器有限公司的 MB23 型水分测定仪测定其含水率。

1.3.3 有机质质量分数和 C/N 比测定

总碳含量的测定用重铬酸钾氧化外加热法,总氮含量的测定用重铬酸钾-硫酸消化法。

1.3.4 种子发芽指数测定

将腐熟好的牛粪有机肥分别稀释 20 倍和 100 倍,每个处理取 30 粒健康的番茄种子进行平皿发芽率试验,以去离子水做空白对照,每个样品做 5 次重复试验。样品置 25℃ 培养箱 96 h 后计算种子发芽率并测量根长,然后计算种子的发芽指数。

1.3.5 其他参数测定

养分质量分数、pH 值、重金属质量分数、蛔虫卵含量、大肠杆菌含量根据农业行业标准 NY 525—2002《有机肥料》测定。全磷含量采用钒钼黄比色法分光光度计测定,全钾含量采用火焰光度法 FP6410 型火焰光度计测定,pH 值采用肥水质量比 1:5 用 ORION 酸度计测定,电导率采用肥水质量比 1:1 用雷磁 DDS-307 型电导率仪测定,重金属质量分数、蛔虫卵含量、大肠杆菌含量按 GB 8172—1987 测定。

1.3.6 单因素试验

(1) C/N 比

将牛粪与核桃果枝按 3:1 的比例混合均匀,含水率为 65%,通过添加尿素(C/N 比为 0.43)调整

C/N 比,原料的 C/N 比设 5 个水平,分别为 15、20、25、30、35,复合微生物菌剂用菌剂 2,接种量为 0.3%,3 d 翻堆一次,发酵周期 30 d,通过晾晒的方式,调整含水率。

(2) 菌剂

将牛粪与核桃果枝按 30:9 的质量比例混合均匀,含水率为 65%,原料的 C/N 比为 30,复合微生物菌剂设 3 个水平,分别为菌剂 1、菌剂 2 和不接菌剂,菌剂接种量均为 0.3%,3 d 翻堆一次,发酵周期 30 d。

(3) 翻堆间隔时间

将牛粪与核桃果枝按 30:9 的质量比例混合均匀,含水率为 65%,原料的 C/N 比为 30,复合微生物菌剂用菌剂 2,接种量为 0.3%,翻堆间隔时间设 5 个水平,分别为 1、2、3、4、5 d 一次,发酵周期 30 d。

以上单因素试验均重复 2 次,数据均为 2 次试验的平均值。

1.3.7 三因素正交试验

通过前期的单因素试验,选择有代表性的部分因素水平开展正交试验。选用三因素三水平正交 $L_9(3^3)$ 试验,包含 9 个水平组合的试验方案,找出较优的生产条件。选取 C/N 比、菌剂类型、翻堆间隔时间作为因素,正交试验因素水平见表 2。

表 2 因素水平
Tab.2 Factors and levels

水平	因素		
	C/N 比	菌剂类型	翻堆间隔时间/d
1	20	菌剂 1	2
2	25	菌剂 2	3
3	30	不加菌剂	4

1.4 数据统计处理方法

运用正交试验法、极差分析法、方差分析法及综合平衡法对数据进行分析及最优参数优化。试验数据采用 SPSS 17.0 统计软件进行方差和相关性分析。

2 试验结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 C/N 比对发酵的影响

物料的 C/N 比可以通过添加高含碳量或高含氮量的材料来加以调整,秸秆、杂草、枯枝和树叶等物质含纤维素、木质素、果胶等较多,C/N 比较高,可以作为高碳添加材料,而畜禽粪便含氮量高,可作为高氮添加物质。本试验选用粉碎后的核桃果枝和尿素调节 C/N 比,实现了枯枝的废弃物资源化利用。由图 3 可知,C/N 比为 25 时,物料发酵温度最

高,最高温度为 68℃,且温度大于 55℃ 的高温保持 16 d,符合 NY/T 394—2000 的卫生标准要求。C/N 比为 30 时,物料前期升温最快,但随后温度下降,这是因为条垛式发酵周边没有围护结构,发酵前期物料温度受外界温度影响较大,当外界温度降低时,发酵物料温度也随之降低,好的发酵条件将减少物料发酵温度对外界环境的依赖,发酵后期物料温度受外界温度影响很小。C/N 比为 15 和 35 时,最高温度分别为 55℃ 和 54℃,且温度大于 55℃ 的高温仅维持 2 d,不符合国家堆肥的卫生标准要求。这是因为 C/N 比过高,微生物由于氮不足,生长受到限制,有机物降解速率变缓,温度升不起来,从而延长发酵时间。同理,C/N 比过低,发酵过程产生氨,有机物降解速率也会变缓,发酵温度高温持续时间太短,而且造成氮的损失,导致产品质量下降。

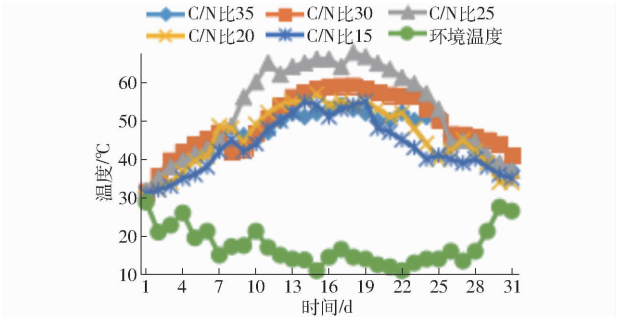


图 3 不同 C/N 比发酵温度变化曲线

Fig.3 Effects of carbon nitrogen ratio on fermentation temperature

C/N 比为 25 时,发芽指数最高,为 93.3%,说明物料腐熟效果较好;C/N 比为 15 和 35 时,发芽指数最低,分别为 70.0% 和 76.6%,说明物料没有完全腐熟。

综合比较,为使试验结果更加精确,考虑物料升温时间、高温持续时间和发芽指数试验结果,最终确定取 20、25 和 30 为正交试验 C/N 比因素水平值。

2.1.2 菌剂类型对发酵的影响

添加微生物菌剂是牛粪发酵过程中的关键因素,对发酵过程的控制,实际上就是对发酵物料中微生物的控制。由图 4 可知,添加微生物复合菌剂的发酵温度明显高于不添加菌剂的试验组,添加菌剂的两组最高温度分别为 60℃ 和 53℃,超过 50℃ 高温维持时间分别为 14 d 和 13 d,高温达到 50℃ 所用时间分别为 10 d 和 12 d。而不加复合菌剂的处理最高温度为 55℃,超过 50℃ 高温维持时间为 9 d,达到 50℃ 所用时间为 11 d。由此可见,添加菌剂的两组比不加菌剂的对照组,高温持续时间长,堆体温度受外界低温影响较小,加快物料的腐熟,提高物料的腐熟度。这是因为向物料中接种微生物菌剂,能够

增加物料中微生物总数,由于各菌种之间相互协同作用,形成复杂而稳定的生态系统,使物料中的微生物迅速繁殖,发酵物料的高温期提前,物料的腐熟度提高。试验结果同时表明,菌剂 2 比菌剂 1 在最高温度、高温持续时间和达到高温所用时间方面表现更优异。

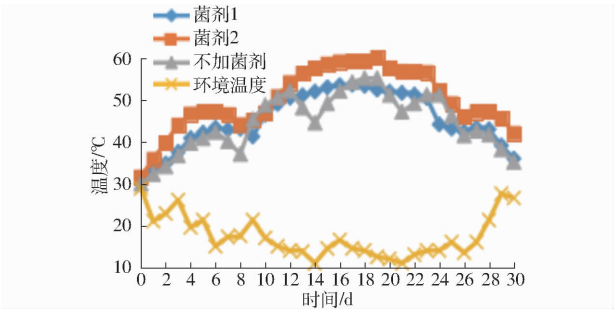


图 4 不同菌剂类型的发酵温度变化曲线
Fig.4 Effects of complex microbial community on fermentation temperature

添加菌剂的两组试验比不添加菌剂的对照组发芽指数高,添加菌剂的两组试验发芽率均在 90% 以上,而对照组发芽指数只有 73.3%,说明对照组牛粪发酵不充分,没有完全腐熟。

2.1.3 翻堆次数对发酵的影响

牛粪在好氧发酵过程中,翻堆起到供氧、散热和降低含水率的作用,不同的翻堆间隔时间对发酵有不同的影响。如图 5 所示,在不同翻堆次数条件下,温度在发酵过程中的变化趋势基本一致,先后经历了升温期、高温期和降温期 3 个阶段。翻堆间隔时间为 1、2、3、4、5 d 时,最高发酵温度分别为 58、59、60、67、56℃;高温持续时间分别为 12、15、14、17、13 d;达到 50℃ 高温所需时间分别为 12、9、10、7、6 d。翻堆间隔时间为 5 d 的最高温度较低,高温持续时间较短,主要原因是翻堆间隔时间太长,不能满足堆体发酵对氧气的需求量,出现局部厌氧发酵,抑制腐熟进程。翻堆间隔时间为 1 d 的最高温度较低,达到高温所需时间最长,主要原因是翻堆间隔时间太短,堆体产生热量散失太快,影响堆体升温 and 高温持续时间。

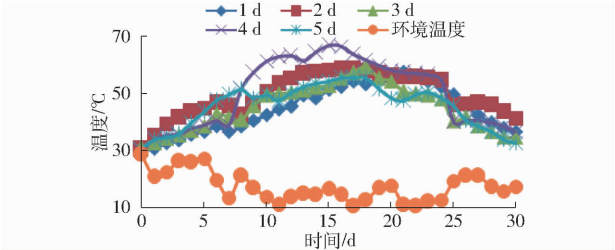


图 5 不同翻堆间隔时间发酵温度变化曲线
Fig.5 Effects of days between turning of organic manure on fermentation temperature

翻堆间隔时间对发芽指数影响较大,翻堆间隔时间为 2、3、4 d 时,发芽指数均在 90% 以上,说明这 3 组试验牛粪发酵较充分,腐熟完全。因此,综合考虑最高发酵温度、高温持续时间、达到高温需要的时间和发芽指数,将正交试验中翻堆间隔时间因素水平值确定为 2、3、4 d。

2.2 多因素正交试验

2.2.1 正交试验结果与极差分析

根据表 3 所示的极差分析结果可以看出:影响发芽指数的主次顺序为 B、A、C(A、B、C 为因素水平值),分析所得最优处理组合为 $A_2B_2C_2$,即 C/N 比为 25,选用菌剂 2,翻堆间隔时间为 3 d。影响有机质质量分数因素的主次顺序为 B、A、C,分析所得最优处理组合为 $A_2B_1C_3$,即 C/N 比为 25,菌剂选用菌剂 1,翻堆间隔时间为 4 d。影响总养分质量分数因素的主次顺序为 C、B、A,分析所得最优处理组合为

表 3 牛粪发酵试验结果与极差分析

试验序号		因素			发芽	有机质	总养分
		A	B	C	指数/ %	质量分 数/%	质量分 数/%
1		1	1	1	76.6	49.4	11.31
2		1	2	2	96.6	44.6	12.92
3		1	3	3	80.0	39.4	13.04
4		2	1	2	93.3	52.3	12.31
5		2	2	3	96.6	47.9	14.86
6		2	3	1	76.6	40.8	10.57
7		3	1	3	80.0	51.2	13.74
8		3	2	1	83.3	42.5	11.84
9		3	3	2	70.0	31.6	11.60
发芽指数		K_1	253.20	249.90	236.50		
		K_2	266.50	276.50	259.90		
		K_3	233.30	226.60	256.60		
		k_1	84.33	83.30	78.83		
		k_2	88.83	92.17	86.63		
		k_3	76.67	75.53	85.53		
		极差 R	12.16	16.64	7.80		
		优方案	A_2	B_2	C_2		
		K_1	133.4	152.9	132.7		
		K_2	141.0	135.0	128.5		
有机质 质量分数		K_3	125.3	111.8	138.5		
		k_1	44.47	50.97	44.23		
		k_2	47.00	45.00	42.83		
		k_3	41.77	37.27	46.17		
		极差 R	5.23	13.70	3.34		
		优方案	A_2	B_1	C_3		
		K_1	37.27	37.36	33.72		
		K_2	37.74	39.62	36.83		
		K_3	37.18	35.21	41.64		
		k_1	12.42	12.45	11.24		
总养分 质量分数		k_2	12.58	13.21	12.28		
		k_3	12.30	11.74	13.88		
		极差 R	0.28	1.47	2.64		
		优方案	A_2	B_2	C_3		

$A_2B_2C_3$,即 C/N 比为 25,菌剂选用菌剂 2,翻堆间隔时间为 4 d。

2.2.2 正交试验结果方差分析

通过正交试验和极差分析得出各试验因素对试验指标影响的最优组合,再通过方差分析,分别对影响牛粪和核桃果枝混合条垛式发酵评价指标中发芽指数、有机质质量分数、总养分质量分数各因素进行显著性检验,结果见表 4 所示。

表 4 方差分析					
Tab. 4 Variance analysis					
指标	方差来源	离均差平方和	自由度	均方	F
发芽指数	A	186.13	2	93.07	5.76
	B	415.61	2	207.81	12.86
	C	106.94	2	53.47	3.31
	误差	32.32	2	16.16	
	总和	741.00	8	92.63	
有机质质量分数	A	41.10	2	20.55	3.97
	B	283.10	2	141.55	27.38
	C	16.81	2	8.41	1.63
	误差	10.34	2	5.17	
	总和	351.35	8	43.92	
总养分质量分数	A	0.061	2	0.03	0.75
	B	3.24	2	1.62	40.5
	C	10.62	2	5.31	132.5
	误差	0.07	2	0.04	
	总和	13.99	8	1.75	

方差分析结果表明,C/N 比、菌剂类型、翻堆间隔时间对发芽指数影响均不显著;而菌剂对有机质质量分数的影响显著;同理从总养分质量分数方差分析结果可知,翻堆间隔时间对总养分质量分数的影响极显著,菌剂对总养分质量分数的影响显著。

2.3 最优工艺条件综合分析

对以上试验和分析结果采用综合平衡法,考虑到翻堆间隔时间对总养分的影响极显著,同时,有机质和总养分的极差分析结果均表明,最优的翻堆间隔时间都是 C_3 ,故最优翻堆间隔时间选择 C_3 ,即 4 d 翻堆 1 次为最佳参数;菌剂对有机质和总养分的影响均显著,影响发芽指数和总养分的最优参数都是 B_2 ,故选择 B_2 ,既菌剂 2 为最佳参数;由于影响发芽指数、有机质质量分数、总养分质量分数的最优 C/N 比均为 A_2 ,故 C/N 比选择 A_2 ,即 25 为最佳参数。分析得到最优的组合方案为 $A_2B_2C_3$ 。在该条件下,发芽指数、有机质质量分数、总养分质量分数分别为 96.6%、47.9%、14.86%,结果较理想。

2.4 有机肥指标检测结果

表 5 是新疆资环遥感信息工程有限公司有机肥料检测报告和实验室检测结果。标准值依据是农业行业标准 NY 884—2012《生物有机肥标准》。

表 5 检测指标		
Tab. 5 Detection indexes		
参数	标准值	实测值
有效活菌数 (cfu)/(个·g ⁻¹)	≥2×10 ⁷	2×10 ⁸
有机质质量分数(以干基计)/%	≥40	47.9
含水率/%	≤30	25
pH 值	5.5~8.5	8.0
粪大肠菌群数/(个·g ⁻¹)	≤100	0.1
蛔虫卵死亡率/%	≥95	100
总砷质量比/(mg·kg ⁻¹)	≤15	8.05
总镉质量比/(mg·kg ⁻¹)	≤3	0.48
总铅质量比/(mg·kg ⁻¹)	≤50	25.0
总铬质量比/(mg·kg ⁻¹)	≤150	35
总汞质量比/(mg·kg ⁻¹)	≤2	2.89
总氮质量分数(以干基计)/%	≥0.5	10.9
总磷质量分数(以干基计)/%	≥0.3	2.42
总钾质量分数(以干基计)/%	≥1.0	1.54
总养分质量分数(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)(以干基计)/%	≥4.0	14.86
发芽指数/%	≥80	96.6

可以得出,有效活菌数、有机质质量分数、总养分质量分数和蛔虫卵死亡率远高出标准规定,重金属质量分数、粪大肠菌群数都优于生物有机肥标准值。

3 结论

- (1)基于小规模单因素试验和工厂化正交发酵试验,得出影响发酵试验的主要影响因子及优化参数为:翻堆间隔时间、菌剂类型、C/N 比。牛粪和核桃果枝混合发酵最佳工艺条件为 $A_2B_2C_3$,即 C/N 比为 25,选用菌剂 2,翻堆间隔时间为 4 d。
- (2)在本研究得到的优化工艺 $A_2B_2C_3$ 条件下,牛粪好氧发酵的升温速度快,高温维持时间长,发酵周期短,发酵所得的生物有机肥产品的腐熟度高,牛粪经好氧发酵处理生产出的生物有机肥全部达到国家行业标准。在该工艺条件下,有效活菌数 (cfu) 为 2×10^8 个/g,总养分质量分数为 14.86%,发芽指数为 96.6%。通过优化牛粪和核桃果枝混合发酵工艺参数,提高了牛粪发酵效率和发酵产品质量,为牛粪的规模化处理和核桃果枝废弃物资源化利用提供了必要的工艺参数和一定的理论依据。
- (3)方差分析结果表明,翻堆间隔时间对总养分质量分数的影响极显著,菌剂对总养分质量分数和有机质质量分数的影响显著,单独的 3 个因素对发芽指数的影响都不显著。
- (4)单因素试验和正交试验均表明,使用两种牛粪腐熟专用菌剂后,与对照组相比,牛粪好氧发酵的升温速度加快,高温持续时间延长,提高了牛粪发酵效率,且菌剂 2 比菌剂 1 更有利于提高发酵效率和有机肥品质。

参 考 文 献

- [1] LIU Ling, WANG Shuqi, GUO Xiaoping, et al. Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting[J]. *Waste Management*, 2018, 73: 101–112.
- [2] 常瑞雪. 蔬菜废弃物超高温发酵工艺[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [3] CHANG Ruixue. Ultra-high temperature fermentation process of vegetable waste[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [4] HUA Weiwei, LIU Hongwang. Succession of the functional microbial communities and the metabolic functions in maize straw composting process[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 256: 333–341.
- [5] 侯超. 减仓式反应器堆肥参数优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [6] HOU Chao. Optimization of composting parameters in reduced-warehouse reactor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] 韩素华, 邱云龙, 沈昊, 等. 新型半开放式发酵槽技术在苏州市区污泥处置中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2017(1): 155–157, 19.
- [8] HAN Suhua, QIU Yunlong, SHEN Hao, et al. Application of new semi-open fermentation tank technology to sludge disposal in Suzhou City[J]. *Urban Roads, Bridges and Flood Control*, 2017(1): 155–157, 19. (in Chinese)
- [9] UTAMI A, HIDAYAT B, MUKHLI S. Study of some chemical properties of ultisol soil applied by biochar and compos from some biomasses and incubation time[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 782(4): 189–193.
- [10] HAO Zhang, ZI Weihua, WEN Zhiliang, et al. The prevention of bio-organic fertilizer fermented from cow manure compost by bacillus sp. xg-1 on watermelon continuous cropping barrier[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): 5717–5720.
- [11] SANDRA P, GEOFF P, SEBASTIAN B, et al. Deriving nutrient criteria to support ‘good’ ecological status in European lakes: an empirically based approach to linking ecology and management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018(6): 153–168.
- [12] 袁兴茂, 范国昌, 陈林, 等. 畜禽粪便高温快速发酵装备设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 413–418.
- [13] YUAN Xingmao, FAN Guochang, CHEN Lin, et al. Design and experiment of high temperature and rapid fermentation equipment for livestock and poultry excrement[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 413–418. (in Chinese)
- [14] 王亮, 刘克锋, 孙向阳, 等. 牛粪好氧发酵规模化生产参数优化[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 115–121.
- [15] WANG Liang, LIU Kefeng, SUN Xiangyang, et al. Optimization of large-scale production parameters for aerobic fermentation of cow manure [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 115–121. (in Chinese)
- [16] 张波, 黄勇, 陈跃军, 等. 以牛粪为主原料的生物有机肥生产工艺研究[J]. *现代农业科技*, 2017(1): 189–189.
- [17] 刘文杰, 沈玉君, 孟海波, 等. 牛粪好氧发酵挥发性物质排放特征及恶臭物质分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 222–230.
- [18] LIU Wenjie, SHEN Yujun, MENG Haibo, et al. Emission characteristics of volatile matter and identification of odor substances during aerobic fermentation of cattle manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(22): 222–230. (in Chinese)
- [19] 朱占江, 李忠新, 刘奎, 等. 一种林果枝粉碎机: CN205922114U[P]. 2017–02–08.
- [20] 马娟, 冯斌, 张杨, 等. 一种电动自走式有机肥发酵翻抛机: CN208617724U[P]. 2019–03–19.
- [21] 王亮, 刘克锋, 孙向阳, 等. 牛粪好氧发酵规模化生产参数优化[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 115–121.
- [22] WANG Liang, LIU Kefeng, SUN Xiangyang, et al. Parameter optimization for large-scale production of cattle manure aerobic fermentation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 115–121. (in Chinese)
- [23] 曹慧玲, 王琦, 胡青平, 等. 添加复合菌剂好氧发酵牛粪生产生物有机肥料工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 189–193.
- [24] CAO Huiling, WANG Qi, HU Qingping, et al. Optimized technology for aerobic fermentation of dairy manure to produce bioorganic fertilizer by inoculating compound microbes[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 189–193. (in Chinese)
- [25] 孙旭, 刘臣伟, 张龙江, 等. 农业废弃物制备生物有机肥及其在小白菜栽培上的应用[J]. *江苏农业学报*, 2017(6): 1333–1341.
- [26] SUN Xu, LIU Chenwei, ZHANG Longjiang, et al. Bioorganic fertilizer from agricultural waste and its application in cabbage cultivation [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017(6): 1333–1341. (in Chinese)
- [27] 袁兴茂, 李霄鹤, 吴海岩, 等. 规模化猪场固粪快速发酵工艺及设备设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 355–360.
- [28] YUAN Xingmao, LI Xiaohe, WU Haiyan, et al. Design and experiment of rapid compost process and equipment by using solid manure on scale pig farm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(19): 355–360. (in Chinese)
- [29] 郭占斌, 衣蕊, 赵立欣, 等. 微好氧预升温序批式干发酵装置设计与应用[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 346–354.
- [30] GUO Zhanbin, YI Rui, ZHAO Lixin, et al. Design and application of micro-aerobic pre-heating sequencing batch dry fermentation device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 346–354. (in Chinese)
- [31] 王粟, 李家磊, 史风梅, 等. 玉米秸秆生物炭与牛粪混合厌氧发酵工艺优化[J]. *黑龙江农业科学*, 2020(6): 87–93.
- [32] WANG Su, LI Jialei, SHI Fengmei, et al. Optimization of anaerobic fermentation process of corn stalk biochar and cow dung [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2020(6): 87–93. (in Chinese)
- [33] 孙笑蕾, 胡正义, 刘莉, 等. 基于肥水资源化的河网区镇域农业面源污染控制系统的构建: 以太湖地区新建镇为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(5): 582–592.
- [34] SUN Xiaolei, HU Zhengyi, LIU Li, et al. Construction of agricultural non-point source pollution control system in town of river network based on utilization of fertilizer and water: a case study of Xinjian in Taihu lake area [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5): 582–592. (in Chinese)
- [35] WANI I, MEHRAJ S, ALI M, et al. Effect of inorganic and organic fertilisers on yield and solid nutrient status of walnut orchard[J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2017, 16(6): 1–13.
- [36] 新疆维吾尔自治区统计局. 2018 新疆统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 355–357.