

# 玉米秸秆和鸡粪连续高温发酵过程和发酵微生物特征分析

王清艺\*, 纪峰, 董浩然, 王俊东

陕西环保产业研究院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月23日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年11月26日

## 摘要

采用连续罐式高温好氧发酵工艺, 研究玉米秸秆和鸡粪在每日连续进料出料过程中发酵变化规律, 并分析发酵产物中细菌的生物多样性特征。结果表明, 在没有发酵升温阶段和降温阶段情况下, 玉米秸秆和鸡粪可以利用连续进料高温发酵进行无害化、资源化处置, 罐内发酵温度、含水率和有机质指标稳定, 发酵产物腐熟度高。不同时期的发酵细菌群落结构相对稳定, 放线菌门细菌的相对丰度均超过50%, 芽孢杆菌的含量随连续发酵时间的增加而增大。

## 关键词

连续式发酵, 玉米秸秆, 鸡粪, 生物多样性

# Analysis of Continuous High-Temperature Fermentation of Corn Straw and Chicken Manure and Characteristic of Fermentation Microorganism

Qingyi Wang\*, Feng Ji, Haoran Dong, Jundong Wang

Shaanxi Environmental Protection Industry Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Using a continuous tank high-temperature aerobic fermentation process, the fermentation

\*通讯作者。

文章引用: 王清艺, 纪峰, 董浩然, 王俊东. 玉米秸秆和鸡粪连续高温发酵过程和发酵微生物特征分析[J]. 农业科学, 2021, 11(11): 1028-1033. DOI: 10.12677/hjas.2021.1111139

changes of corn stalks and chicken manure during the daily continuous feeding and discharging process were studied, and the biological diversity characteristics of the bacteria in the fermentation products were analyzed. The results show that, without the fermentation heating stage and cooling stage, corn stalks and chicken manure can use continuous feed high-temperature fermentation for harmless and resource disposal. The fermentation temperature, moisture content and organic matter indicators in the tank are stable, and the fermentation products are mature with high degree. The community structure of fermenting bacteria in different periods is relatively stable, the relative abundance of Actinomycota bacteria exceeds 50%, and the content of Bacillus increases with the increase of continuous fermentation time.

## Keywords

Continuous Fermentation, Corn Straw, Chicken Manure, Microbial Diversity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

目前农村主要的面源污染包括养殖业产生的畜禽粪便、种植业产生的秸秆焚烧、土壤中过量或余量化肥和农药等[1], 其中畜禽粪便排放和农作物秸秆焚烧是最主要的水体、土体和大气污染源。畜禽粪便中含有大量未被消化的蛋白质、粗脂肪、碳水化合物、B 族维生素、矿物质元素和氮、磷、钾等营养物质[2], 是农业可持续发展的宝贵资源, 若不能及时处理, 不仅造成资源的大量浪费还会对环境造成极大危害[3]。农作物秸秆焚烧不仅增加碳排放, 污染和危害大气环境, 还会破坏农田的养分平衡和微生物群落, 导致土壤养分循环不畅、理化性能变坏[4]。

针对畜禽粪便和秸秆资源化利用问题国内外已经进行了广泛的研究, 主要包括厌氧发酵制备沼气、干化造粒制备燃料, 好氧发酵制备有机肥等, 其中高温好氧发酵能够有效杀死粪便中的病原菌和寄生虫卵、钝化重金属、形成利于植物利用的腐殖质。但是目前露天堆肥的方式存在堆肥时间长、环境污染严重、物料腐熟度差异大, 易受外界温度 and 环境影响。因此研发环保高效自动化新型反应器对畜禽粪便和秸秆的肥料化尤为重要。

本研究以自制高温好氧发酵罐为发酵设备, 以鸡粪、玉米秸秆为原料, 好氧污泥为辅料, 采用每天进料出料的方式连续进行发酵处理, 使罐体内微生物保持较高的活性, 减少发酵升温 and 降温过程, 并生产资源化产品。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 供试原料

鸡粪、玉米秸秆、好氧污泥的化学特性见表 1。初始接种菌剂选用的 VT 菌, 是包括乳酸菌、酵母菌和放线菌, 以及光合细菌、醋酸杆菌、丝状真菌等近 10 个菌株构成的富含纤维素分解菌的复合微生物菌剂。

### 2.2. 实验装置

新型连续式高温好氧发酵罐罐体总体积 105 m<sup>3</sup>, 有效体积 98 m<sup>3</sup>, 自重 26 吨, 装机功率 37.7 kw, 运行功率约 20 kw, 日耗电量 420 度左右(如图 1)。发酵罐采用连续运行模式, 采用机械式搅拌, 每 30 分钟搅拌

7.5 分钟；按照设计能力，每天可直接处理含水率 60%有机固体混合料 8~10 吨，原料最短停留时间 7 天左右；最大通风量为  $0.18 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ，全天 24 小时不间断通风，产生的废气经由排风机通入水洗除臭塔净化。

**Table 1.** Characteristic of chicken mature, corn straw and activated sludge

**表 1.** 鸡粪、玉米秸秆和好氧污泥的理化特性

原料	含水率(%)	有机质(%)	C (%)	N (%)
干鸡粪	10.3	52.7	14.3	1.62
玉米秸秆	14.51	93.1	32.5	0.70
好氧污泥	80.3	60.8	27.3	3.69

注：有机质、碳、氮均为干基百分数。



**Figure 1.** Diagram of new-style continuous aerobic fermentation tank

**图 1.** 新型连续式好氧发酵罐设备图

### 2.3. 发酵与取样

反应器启动阶段取好氧污泥、鸡粪和玉米秸秆按质量比 1:2:5 选取原料制备 40 吨混合料，并加入 30 L VT-1000 液态菌剂混合均匀，放置 3 天后投加进发酵罐中。发酵阶段每天从发酵罐上部投加好氧污泥、鸡粪和玉米秸秆混合比为 1:2:10 的混合料 6 吨，每天从发酵罐底部排放出料 3 吨，连续运行 200 天。

每四天采集一次出料样品，每份样品 100 g 置于自封袋中密封在 4℃ 保存。分别选取第 100 天和第 200 天发酵产物 500 mg，在 Miseq 高通量测序平台上对样品中的细菌进行 16SrRNA 序列分析[5]。

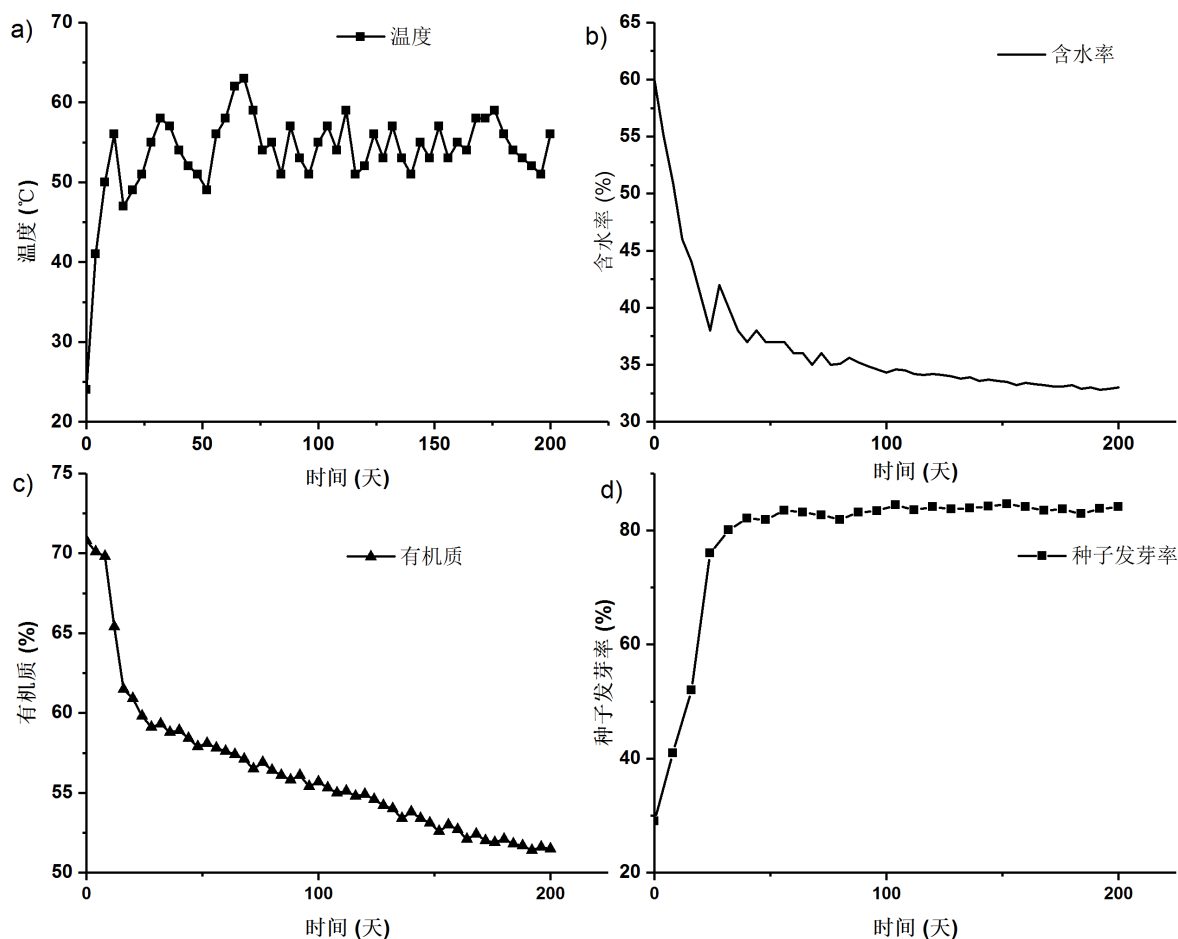
## 3. 结果与讨论

### 3.1. 发酵罐运行结果与分析

#### 1) 发酵区温度变化分析

持续保持在 45℃~65℃ 温度区间是连续式发酵过程的重要条件。24 小时长期保持高温，一方面可

以使得每日的进料迅速分解,减少发酵需要时间,一方面降低发酵区环境因素的波动程度,提高连续式发酵过程的稳定性。连续监测发酵层中部反应温度发现,发酵罐启动阶段温度迅速升高,8日后发酵温度始终在 $45^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$ 范围波动(如图2(a))。试验结果表明,采用连续进料模式,可以维持发酵过程在高温区域稳定运行,不再存在发酵升温 and 降温阶段。



**Figure 2.** Graph of operation status in aerobic fermentation tank (a: temperature of reaction area; b: moisture content in bottom area; c: organic content in bottom area; d: germination index)

**图 2.** 好氧发酵罐运行状况数据图(a: 反应区温度变化; b: 下层含水率变化; c: 下层有机质变化; d: 发酵产物种子发芽率)

## 2) 发酵罐下层含水率变化分析

在连续通风和高温环境下,进料中的水分和有机物分解产生的生成水通过饱和热蒸气的排放实现去除。监测试验过程中发酵罐底层的温度发现,在稳定运行期间(第32天至第200天)底层物料的含水率均未超过40%(如图2(b))。稳定的含水率可以保证出料性质的稳定性。

## 3) 发酵罐下层有机质变化

如图2(c),发酵罐下层物料初始有机质含量与进料中的含量一致,并在试验初始阶段迅速降低至60%以下,这是因为易降解有机物快速分解,上层发酵罐中部分相对稳定的物料因搅拌作用与下层物料混合。随着连续式反应的持续进行,每日新添加的有机质经过高温发酵区后通过重力和搅拌作用进入发酵罐下层,下层的物料逐渐达到稳定状态,有机质含量维持在50%左右,实现物料的稳定化。

### 3.2. 发酵产物分析

#### 1) 主要理化特征

表 2 显示了发酵罐运行 100 天、200 天后所得的发酵产物的主要理化特征。结果表明, 连续进料方式运行的发酵罐, 可以稳定生产出有机质含量 > 50%, 氮磷钾含量充足, 满足国家农业行业有机肥料标准(NY 525-2012)各参数要求的发酵产物。此外, 因为每日新鲜进料会持续补充发酵罐内水分, 产物的水分高于 30%, 通过后续陈化工艺后, 终产物的水分降至 10%~15%。

**Table 2.** Comparison of physicochemical indicators of production with national standards

**表 2.** 发酵产物理化指标和国标的对比

对比项目	有机质/%	TN/%	TP/%	TK/%	总养分/%	水分/%	pH
发酵产物(第 100 天)	55.7	1.03	4.01	3.39	8.43	34.3	7.48
发酵产物(第 200 天)	51.5	0.92	3.86	2.96	7.74	33.0	7.6
国标(NY525-2012)	≥45	—	—	—	≥5.0	≤30	5.5~8.5

#### 2) 种子发芽率(GI)变化

分析发酵产物的种子发芽率随发酵时间的变化可以判断产物腐熟度。当种子发芽率(GI)大于 80%, 可以认为产物完全腐熟, 没有对植物没有毒性[6]。如图 2(d)所示, 发酵罐运行过程中, 产物 GI 值在前期呈现逐渐增大的趋势(第 1 天到第 32 天), 并在之后运行过程稳定保持在 80%~85%, 可以认为经过前期高温反应后, 发酵罐下层的物料完全腐熟, 每日添加的原料不会明显改变排出发酵产物的腐熟程度。而且, 在没有升温 and 降温阶段的条件下, 以鸡粪和秸秆为原料, 仍然可以获得腐熟度高的发酵产物。

### 3.3. 细菌多样性分析

高通量基因方法对发酵过程中第 100 天和第 200 天发酵产物进行细菌多样性研究发现, *Actinobacteriota* (放线菌门)相对丰度最高, 分别占 51.35%和 57.32%, 这表明在第 100 天和第 200 天时发酵产物都处于基本腐熟状态。第 200 天时, *Chloroflexi* (绿弯菌门), *Firmicutes* (厚壁菌门), *Proteobacteria* (变形菌门)的相对丰度也相对较高, 分别占 14.95%, 16.28%, 6.92%。

*Corynebacteriales* (棒状菌目)、*Micrococcales* (微球菌目)、*Thermomicrobiales* (热微菌目)和 *Bacillales* (芽孢杆菌目)是目水平中相对丰度最高的细菌类型, 在第 200 天的样品中分别占 16.46%、14.25%、13.97% 和 2.98%。*Corynebacteriales* 与发酵产物中总有机碳、总氮相关[7], 其中 *Corynebacterium* (棒杆菌属)占绝大部分。*Ornithinococcus* (鸟氨酸球菌属)在好氧污泥和鸡粪中蛋白质的分解过程中发挥重要作用, 因此第 100 天和第 200 天的相对丰度分别为 11.84%和 14.25%。

*Firmicutes* (厚壁菌门)中 *Bacillales* (芽孢杆菌目)相对丰度为增加最显著, 从 1.38%增大到 2.98%, 其中包括 *Bacillus* (芽孢杆菌属)在第 200 天时达到 0.98%。芽孢杆菌既是高温发酵的重要功能菌种, 又可以促进植物的生长和增产, 而且还是微生物肥料标准中有效活菌数的检测成分。通过检测第 200 天产物中有效活菌数发现, 在无外部菌剂添加条件下, 连续式工艺发酵产物的有效活菌数为 0.74 亿/g, 优于国家标准指标 2.7 倍。

大肠杆菌和沙门氏菌均未在产物中检测出, 说明连续式发酵系统在反应过程中可以有效杀灭有害微生物, 实现无害化处理。

## 4. 结论

1) 采用连续式高温好氧发酵罐, 可以实现以玉米秸秆和鸡粪为主, 好氧污泥为辅料的工业化处置。

启动阶段结束后, 发酵过程始终保持高温状态, 出料含水率不超过 40%, 有机质含量维持在 50%左右, 实现无害化处置。

2) 应用连续式高温好氧工艺, 无需发酵升温 and 降温阶段, 就可以生产玉米秸秆和鸡粪的腐熟产物。

3) 发酵产物中细菌群落结构稳定, 放线菌相对丰度最高, 芽孢杆菌的含量随连续发酵时间的增加而增大, 有效活菌数优于国家标准 2.7 倍。

## 基金项目

西安市科技计划项目(20193050YF038NS038)。

## 参考文献

- [1] 崔健, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 335-339.
- [2] 晏琛, 曹雷鹏, 刘玉环, 等. 利用新型高温好氧堆肥器提高鸡粪谷壳有机肥肥效[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 1103-1111.
- [3] 杨晶. 畜禽粪便有机肥资源利用探讨[J]. 黑龙江农业科学, 2014(6): 152-154.
- [4] 王国宇, 张烜华, 徐加宽, 等. 玉米秸秆生物反应堆对大棚西瓜生长环境、产量及品质的影响[J]. 世界生态学, 2017, 6(3): 125-130.
- [5] Villar, I., Alves, D., Garrido, J., *et al.* (2016) Evolution of Microbial Dynamics during the Maturation Phase of the Composting of Different Types of Waste. *Waste Management*, **54**, 83-92.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.011>
- [6] Yang, X., Liu, E.K., Zhu, X.M., *et al.* (2019) Impact of Composting Methods on Nitrogen Retention and Losses during Manure Composting. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, 3324.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph16183324>
- [7] Wang, J., Shi, X., Zheng, C., *et al.* (2022) Different Responses of Soil Bacterial and Fungal Communities to Nitrogen Deposition in a Subtropical Forest. *Science of the Total Environment*, **755**, Article ID: 142449.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142449>