

## 畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例

邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 唐荣, 杨祖沐, 秦树平, 陈志, 周顺桂

### 引用本文:

邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 等. 畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2405-2411.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1108>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战

焦敏娜, 任秀娜, 何熠锋, 王权, 李荣华, 李季, 张增强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2361-2371 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1138>

### 畜禽粪便堆肥过程中碳氮损失及温室气体排放综述

袁京, 刘燕, 唐若兰, 马若男, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2428-2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0986>

### 畜禽粪便堆肥前期理化及微生物性状研究

曹云, 常志州, 黄红英, 徐跃定, 吴华山

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2198-2207 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.023>

### 好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展

徐鹏翔, 王越, 杨军香, 李季

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2403-2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0898>

### 炭基辅料对羊粪好氧堆肥中氮素损失的影响

王海候, 何胥, 陶玥玥, 金梅娟, 陆长婴, 施林林, 周新伟, 沈明星

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 928-936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0664>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邢睿智, 艾超凡, 王梦怡, 等. 畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2405–2411.

XING R Z, AI C F, WANG M Y, et al. Hyperthermophilic composting of livestock manure: A case study[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2405–2411.



开放科学 OSID

## 畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例

邢睿智<sup>1</sup>, 艾超凡<sup>1</sup>, 王梦怡<sup>1</sup>, 唐荣<sup>1</sup>, 杨祖沐<sup>2</sup>, 秦树平<sup>1</sup>, 陈志<sup>1\*</sup>, 周顺桂<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学资源与环境学院/福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002; 2. 福建省致青生态环保有限公司, 福建福清 350307)

**摘要:**超高温好氧堆肥是高效、绿色的有机固体废弃物资源化技术, 为了弥补超高温好氧堆肥在大规模工程性处理研究中的不足, 通过对规模化畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例(处理量 300 t·d<sup>-1</sup>)的分析, 阐述了超高温好氧堆肥在工程应用中的原理、工艺选择、运行参数以及经济效益。槽式及条垛式规模化畜禽粪便超高温好氧堆肥的最高温度可超过 80 °C, 20~30 d 完成堆肥。堆肥结束后, 含水率和有机质分别保持在 44% 和 35% 左右, EC 值为 2.9 mS·cm<sup>-1</sup>, 水溶性有机碳和水溶性总氮的含量分别保持在 3.0 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.9 mg·kg<sup>-1</sup>。此外, 腐熟料经过二次加工, 可制备为功能性有机肥料。超高温好氧堆肥投资成本小、产品价值高, 具有更高的经济效益。目前, 已形成的可复制的畜禽粪便循环利用新模式, 可为农林残余、生活垃圾、厨房残余等其他有机固废的规模化超高温好氧堆肥处置提供参考。

**关键词:** 畜禽粪便; 超高温好氧堆肥; 嗜热微生物

中图分类号: S141.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2405-07 doi:10.11654/jaes.2021-1108

### Hyperthermophilic composting of livestock manure: A case study

XING Ruizhi<sup>1</sup>, AI Chaofan<sup>1</sup>, WANG Mengyi<sup>1</sup>, TANG Rong<sup>1</sup>, YANG Zumu<sup>2</sup>, QIN Shuping<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>1\*</sup>, ZHOU Shungui<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment / Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Zhiqing Ecological Environment Protection Co., Ltd., Fuqing 350307, China)

**Abstract:** Hyperthermophilic composting is an efficient and green resource recycling technology of organic solid waste. To address the lack of engineering research on large-scale hyperthermophilic composting, a case of large-scale livestock manure hyperthermophilic composting was investigated (300 t·d<sup>-1</sup>), including the principles, process selection, operating parameters, and economic benefits in the application of the hyperthermophilic composting process. The results showed that the maximum temperature for large-scale hyperthermophilic composting of livestock manure was above 80 °C, and fermentation was completed in 20 to 30 days with trough and windrow composting. After composting, the moisture content and organic matter were maintained at approximately 44% and 35%, respectively, the EC value was 2.9 mS·cm<sup>-1</sup>, and the levels of water-soluble organic carbon and water-soluble total nitrogen were maintained at 3.0 mg·kg<sup>-1</sup> and 0.9 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Moreover, the decomposed material could be prepared into functional organic fertilizer after secondary processing. Hyperthermophilic composting has low investment cost, high product value, and increased economic

收稿日期: 2021-09-25 录用日期: 2021-10-19

作者简介: 邢睿智(1993—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士研究生, 从事农业固体废物资源化研究。E-mail: 13799964441@163.com

\*通信作者: 陈志 E-mail: chen\_zhi0529@163.com

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2020J01564); 福建农林大学校杰青项目(xjq201904); 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2020068A)

**Project supported:** The Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2020J01564); The Science Fund for Distinguished Young Scholars of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq201904); The Special Fund for Scientific and Technological Innovation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2020068A)

benefits. Currently, a new model of reproducible recycling and utilization of livestock manure has been developed, which can provide a reference for the large-scale hyperthermophilic composting disposal of organic solid waste, such as agricultural and forestry residues, domestic waste, and kitchen residue.

**Keywords:** livestock manure; hyperthermophilic composting; hyperthermophilic microbes

畜禽养殖业在我国国民经济中占有极其重要的地位,随着畜禽养殖集约化、规模化发展,所产生的环境问题也日益突出<sup>[1-2]</sup>。第二次全国污染源普查及相关研究显示<sup>[3-4]</sup>,2017年畜禽粪便的化学需氧量(COD)排放量达604.83万t,占农业总排放量的50%以上,已成为我国农业面源污染的重要来源之一。虽然畜禽粪便会导致环境污染,但也是巨大的生物质资源及能源库。堆肥是畜禽粪便资源化利用的重要技术手段,随着畜禽粪便的产量逐年递增,传统有机固废处置技术已不能满足超额的处理需求。因此,寻求一种集无害化、资源化、高值化于一体的畜禽粪便处理技术,是解决畜禽粪便环境污染,构建绿色低碳循环发展农业体系的根本途径。

超高温好氧堆肥作为一种新技术,已成功应用于有机固体废物的无害化和资源化工程中。该技术通过嗜热微生物代谢分解有机物产生的化学及生物热能,可以在不提供额外热能的前提下,短时间将堆肥温度提升至80℃以上<sup>[5]</sup>。与传统堆肥相比,超高温好氧堆肥具有分解有机物速率快、腐殖化程度高、腐熟时间短等优点,并且可以有效控制温室气体减排和重金属钝化,且对抗性基因和微塑料等新型污染物具有很好的降解能力,极大程度降低了堆肥过程中出现二次污染的风险<sup>[6-9]</sup>。然而,目前超高温好氧堆肥的研究,大多基于实验室内小型堆肥或模拟堆肥开展,处理量大多在几十至几百千克,比较欠缺大规模工程性处理研究。为此,本文主要基于超高温好氧堆肥技术,对实际的畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例进行分析,以期超高温好氧堆肥在全国范围内的工程化推广应用提供理论支撑。

## 1 超高温好氧堆肥工程化原理

超高温好氧堆肥是为了弥补传统堆肥存在发酵温度低、周期长、有效活菌数低等弊端而出现的新技术。自YOSHII等<sup>[10]</sup>首次发现嗜热微生物对堆肥温度升高具有非常重要的作用后,全世界范围内开展了大量有关超高温好氧堆肥技术的研究。通过向堆肥中添加嗜热微生物,使得堆肥发酵温度显著提高,并大幅度缩短堆肥的腐熟时间,实现有机固体废物的

高效处理及资源化利用。其中,基于嗜热微生物构建超高温菌剂,成为提高超高温好氧堆肥处理固体废物效率,增加堆肥产品质量的关键因子。为此,本课题组陆续从火山口、热泉、高温堆肥等样品中分离鉴定出多株嗜热菌,并通过嗜热菌株对碳源利用的差异性进行筛选,最终获得9株兼具极端耐热能力和降解有机物能力的功能型微生物菌种,主要包括芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)、地芽孢杆菌(*Geobacillus* sp.)、嗜热菌(*Calditerricola yamamurae*)、甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylotrophicus*)等<sup>[5,11]</sup>。随后,课题组又进一步探究了这些微生物的生理代谢、功能和相关关系,并通过菌株复配及实际堆肥的工程试验,研制出可快速降解堆肥原料中有机物、促进堆肥快速腐熟的超高温好氧堆肥菌剂。与传统堆肥的菌剂相比,超高温好氧堆肥菌剂及激活剂能够大幅提高堆肥温度20~30℃,显著缩短堆肥腐熟时间30%以上<sup>[12]</sup>,实现有机废物的无害化处理及资源利用(表1)。

表1 传统堆肥与超高温好氧堆肥工艺参数及处理效果比较

Table 1 Comparison of technological parameters and treatment effects between traditional composting and hyperthermophilic composting

工艺参数及处理效果 Parameter and effect	传统堆肥 Traditional composting	超高温好氧堆肥 Hyperthermophilic composting
最高温度	50~70℃	80℃以上
持续高温周期	≥55℃持续7d以上	≥80℃持续5~7d
堆肥周期	30~50d	15~25d
初始C/N	25:1~35:1	6:1~8:1
减量化效果	≤50%	≥75%
蛔虫卵杀灭效果	≥95%	100%
抗性基因消减效果	≥35%	≥90%
微塑料降解效果	<5%	≥40%
重金属钝化效果	≥3%	≥15%

## 2 超高温好氧堆肥工程化工艺选择

针对不同有机固体废弃物处理对象,选择合适的堆肥方式也是提高堆肥效率的重要手段。目前,已有的堆肥方式有沟壑坑塘法堆肥、柴草垛法堆肥、槽式堆肥、条垛式堆肥、反应器堆肥(表2)。沟壑坑塘法

及柴草垛法堆肥主要适用于秸秆及畜禽粪便田间就地处理,但处理周期极长且无害化不彻底,资源化效率低。而反应器堆肥主要适用于中小规模养殖场的有机固体废弃物,其处理量小,工艺繁琐,后期维护成本较高<sup>[13]</sup>。针对日处理量达到百吨以上的有机固体废弃物,一般选择槽式及条垛式堆肥,这两种方式通过构建防渗透、防腐、防雨场地,可以满足大规模畜禽粪便的处理。曝气装置以及机械(挖掘机、翻抛机)周期性作业,可对物料进行充分供养及搅拌,缩短堆肥腐熟周期。此外,通过添加超高温菌剂,促使传统堆肥成为超高温好氧堆肥,可以弥补槽式堆肥温度较低以及条垛式堆肥散热较快,不易发酵等缺点,实现畜禽粪便高效的无害化处置及资源化利用。

工程化超高温好氧堆肥的工艺流程如图1所示。首先将新鲜畜禽粪便(例如:牛粪、猪粪、鸡粪等)进行收集,然后将其与辅料及超嗜热微生物菌剂按照一定的比例进行混合搅拌,一般辅料主要成分为稻壳、已腐熟的干料或蘑菇菌渣等<sup>[11,14]</sup>。控制初始混合料的

含水率为60%~70%,将搅拌均匀的混合料运输至堆肥槽,同时开启鼓风机进行间歇式曝气,并对堆体定期翻堆,以加速物料水分蒸发,提高堆肥腐熟进程。堆肥结束后的腐熟料,通过添加功能菌剂二次堆肥,最终得到功能肥料产品(如茶叶有机化肥等),该产品具有减少化肥使用、改善耕地质量、提升农产品品质等作用<sup>[15]</sup>。

### 3 畜禽粪便超高温好氧堆肥规模化工程案例分析

以福清市畜禽粪便资源化利用整县推进项目为例,该项目由福建省致青生态环保有限公司在福清市渔溪镇建立超高温好氧堆肥畜禽粪便资源化产业基地(图2A),目前已正式运行,处理畜禽粪便量约为 $320\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。堆肥方式主要采用槽式和条垛式超高温好氧堆肥。槽式超高温好氧堆肥如图2B所示,堆肥槽长7.2 m、宽22 m、高4 m,每个槽处理量约为100 t,采用间歇式曝气进行供氧,以提高超高温好氧堆肥腐熟进程。条垛式超高温好氧堆肥如图2C所示,主堆肥槽为钢筋水泥框架,长80 m、宽22 m、高3 m,处理量约为 $300\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ,底部铺设曝气管道,每隔10 min曝气20 min。

两种堆肥方式在工程应用上的主要区别是翻堆方式及出料的不同。槽式堆肥通常利用铲车进行物料翻堆,翻堆速度较快,翻堆频率控制在2 d左右,堆肥结束时可全部出料。而条垛式堆肥可持续进料,主要利用移动式翻抛机每日进行一次翻抛,将物料从起始端向堆肥槽另一端移动,循环往复直至堆肥结束,整个堆肥周期内翻抛总次数不少于15次。在工程应

表2 不同堆肥方式的堆肥周期及应用范围

Table 2 Fermentation period and application range of different composting methods

堆肥方式 Composting method	堆肥周期 Composting period	应用范围 Application range
沟壑坑塘法	>90 d	田间秸秆及畜禽粪便的处理
柴草垛法	280~360 d	田间秸秆及畜禽粪便的处理
槽式堆肥	25~40 d	大规模有机固体废物集中化处理
条垛式堆肥	30~40 d	大规模有机固体废物集中化处理
反应器堆肥	视反应器规模而定	中小规模养殖场的有机固体废物就地处理

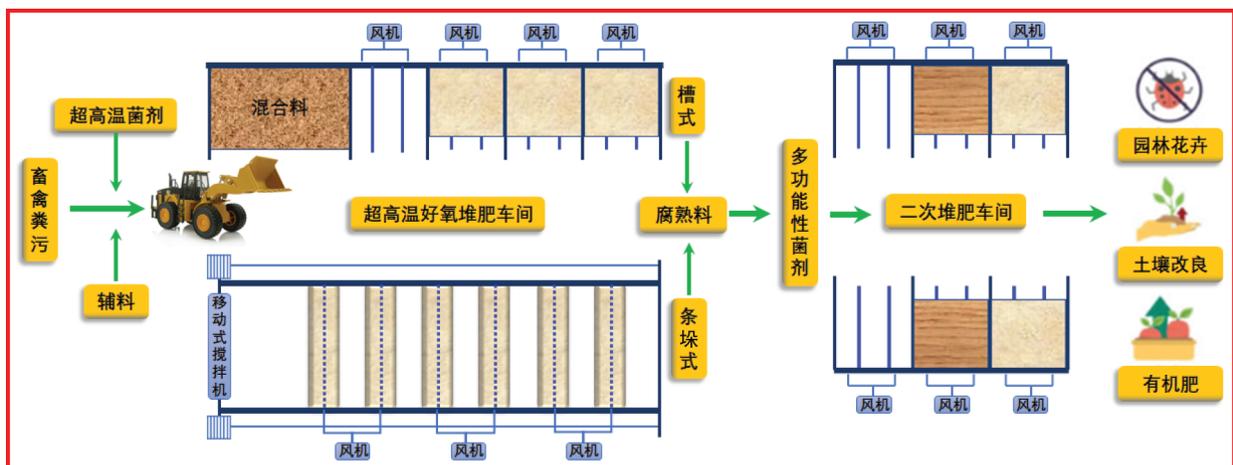


图1 超高温好氧堆肥的工程应用流程

Figure 1 Engineering application flow chart of hyperthermophilic composting

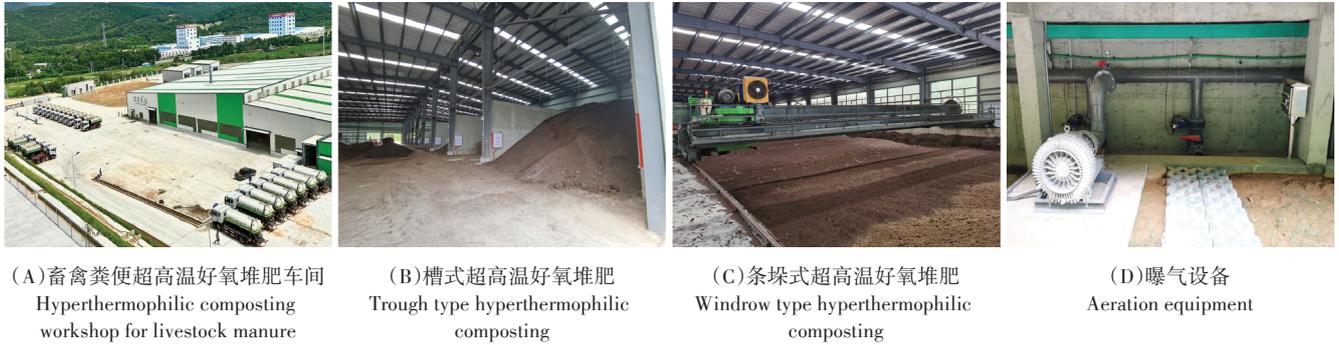


图2 福清市畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例

Figure 2 Hyperthermophilic composting engineering case of livestock manure in Fuqing City

用中,条垛式超高温好氧堆肥的效率更高,因其可以利用翻抛机进行作业,全程自动化运行,减少了槽式堆肥需要利用人工驾驶挖掘机进行翻堆的成本。并且翻抛过程可使超高温好氧堆肥得到充分供氧,增强了畜禽粪便与超高温菌剂的充分混合,从而更好地发挥嗜热微生物的作用,提高畜禽粪便处理效率,缩短腐熟周期。

基于该项目实施的畜禽粪便超高温好氧堆肥,两种堆肥方式堆体最高温度能超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且高温期可持续7~11 d,堆肥周期为20~30 d。堆肥过程腐熟速度快,无臭味及渗滤液产生,极大程度地避免了堆肥过程中出现二次污染的可能。堆肥腐熟料在有机肥加工车间经过进一步处理,每年可生产有机肥约5万t,实现畜禽粪便全组分资源化利用,该项目已成为全国先进的畜禽粪便资源化利用整县模式示范性工程,对我国推进农业绿色发展具有引领性作用。

#### 4 工程化超高温好氧堆肥的运行参数

运行参数的控制是决定超高温好氧堆肥良好运行的重要因素,主要包括:温度、含水率、有机质、腐熟度、电导率(EC)以及碳氮含量等。福清市畜禽粪便资源化利用项目中条垛式超高温好氧堆肥的运行参数如图3所示。整个堆肥周期为26 d,最高温度达到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图3A)。根据《粪肥无害化卫生要求》(GB 7959—2012)中的规定,最高堆温达到 $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,持续5~10 d,可有效杀灭所有致病微生物。此外,堆体温度的高低,在实际的堆肥管理中,还需要通过曝气及翻堆等操作进行调控,避免高温造成碳、氮等营养元素的流失。初始混合料含水率是影响微生物代谢活性的重要因素,一般控制在65%左右,随着温度的升高以及腐熟程度的加深,含水率下降,最终腐熟料含水率保

持在45%左右(图3B)。同时,在微生物的作用下,畜禽粪便中一些碳水化合物、脂肪和氨基酸等物质会被降解,导致有机质含量由55%下降至30%左右(图3C),这进一步说明超高温好氧堆肥在工程应用中对于有机质的分解具有很好的效果<sup>[6]</sup>。

超高温好氧堆肥在工程领域中的应用除了可以有效处理固体废物,更为重要的一点就是堆肥产品的输出。种子发芽指数(GI)是评价堆肥腐熟度最敏感的重要指标<sup>[12]</sup>,由图3D可知,堆肥初始物料的GI值为62.3%,堆肥3 d后降低至38.7%,这是由于嗜热微生物分解有机质产生大量有机酸、氨类物质而导致的。随后GI值逐渐上升,第14 d时GI值为98.7%,达到腐熟标准( $>80\%$ ),堆肥结束时,GI值为107.7%。由此可知,超高温好氧堆肥可缩短腐熟时间。此外,EC是衡量堆肥腐熟料可溶性盐含量对作物生长适应性的重要指标,也是判断堆肥质量的重要因素<sup>[4]</sup>。如图3E所示,超高温好氧堆肥的EC在前10 d,从最初的 $1.6\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 上升至 $6.4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,这可能是由于畜禽粪便在极端嗜热微生物的作用下分解产生大量铵盐、磷酸盐等物质引起的<sup>[8]</sup>。但10 d后堆肥的EC迅速下降,堆肥结束时EC为 $2.9\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,低于敏感植物忍受的EC值( $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下),符合无公害堆肥处理标准,并有利于提高腐熟料的矿物质盐含量,从而提升了功能性产品,如有机肥的有效肥力<sup>[17]</sup>。在堆肥过程中,水溶性有机碳(WTOC)及水溶性总氮(WTN)更容易被微生物利用。由图3F可知,超高温好氧堆肥过程中WTOC和WTN的整体趋势均为前期升高后期下降。随着堆肥进程的加深,嗜热微生物会加速降解有机物,导致WTOC含量的上升,而后微生物活性增强,导致WTOC被代谢消耗而逐渐下降,最终维持在 $3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,表明超高温好氧堆肥能够促进有机

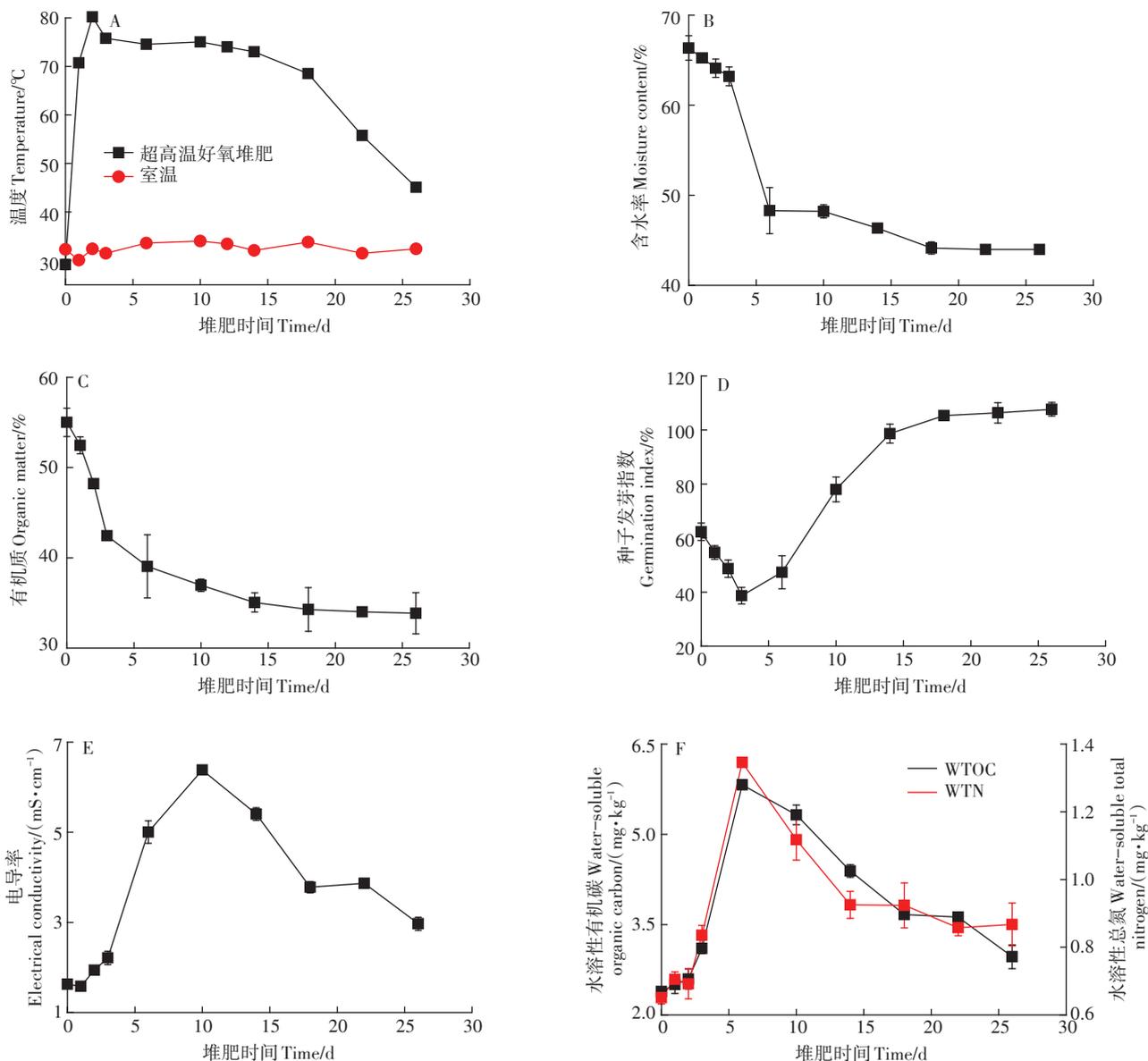


图3 超高温好氧堆肥在工程应用中的主要参数

Figure 3 Main parameters of hyperthermophilic composting in engineering application

质的分解转化<sup>[18]</sup>。而 WTN 含量的降低,可能是由于超高温好氧堆肥温度较高,导致氮以氨的形式挥发,造成损失<sup>[19]</sup>。基于以上结果,超高温好氧堆肥工程应用的运行参数为:堆肥进程中 70 °C 高温持续 14 d 以上,初始含水率为 65%;堆肥结束后,含水率保持在 44% 左右,有机质含量保持在 35% 左右,EC 为 2.9 mS·cm<sup>-1</sup>,水溶性有机碳和水溶性总氮的含量分别保持在 3.0 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.9 mg·kg<sup>-1</sup>。综上所述,超高温好氧堆肥的运行参数需要根据实际的需求进行调控,如保持合适的含水率、EC、腐熟度等,这将有助于提高堆肥的质量,缩减工程成本。

## 5 经济效益分析

超高温好氧堆肥相对于其他畜禽粪便处理方式具有更好的无害化处理效果,也具备更高的经济效益。决定超高温好氧堆肥经济效益的主要因素主要包括:运行成本、肥料及环境治理成本。首先是投资成本,超高温好氧堆肥技术成熟,投资成本较低,场地采用钢筋混凝土结构即可。与焚烧、厌氧消化等有机固体废物处理工艺相比,由于超高温好氧堆肥无臭气产生,节省了相应的废气收集及处理设施的资金投入。此外,超高温好氧堆肥在运行过程中操作简单,

设备简单,运行总成本为70~80元·t<sup>-1</sup>(表3),仅为焚烧、厌氧消化等工艺的25%~33%,具有绿色、低碳等优点。除运行成本外,通过超高温好氧堆肥处理后的腐熟料经过再加工制备的有机肥料,具有极高的经济价值。目前,传统的有机肥售价为1200元·t<sup>-1</sup>,而市场上常用的氯基复合肥,国内主流厂家中,45%的报价在1850~2000元·t<sup>-1</sup>,45%在2000~2150元·t<sup>-1</sup>,成本较高,且能被植物吸收利用的有效肥力因植物品种及土壤质地的区别会发生改变。以超高温好氧堆肥腐熟料为原料所制备的有机肥富含丰富的N、K、P等植物所必需的营养元素,市场售价为570元·t<sup>-1</sup>,仅为传统有机肥价格的二分之一,传统复合肥的四分之一左右。此外,通过添加多功能型菌剂,可以制备出具有抵抗病虫害、改良土壤的微生物有机肥。这种功能多元、营养丰富、售价较低的功能性肥料具有良好的市场竞争性。此外,利用焚烧、填埋等方式对畜禽粪便进行处理的过程中,即使使用脱硫脱硝装置以及渗滤液过滤装置,也难免还会产生污染物,造成大气及水体的污染,导致臭氧层破坏、污染周边自然水体等现象的发生,并且不能实现其资源化利用。针对这些环境污染进行修复,所消耗的成本巨大,且修复时间较长、修复效果一般。而超高温好氧堆肥是绿色无污染的畜禽粪便处理技术,其无害化、减量化、资源化水平远高于传统堆肥,且从源头避免了畜禽粪便处置不当而引起的环境问题,减少了因环境治理而产生的成本。基于以上分析,超高温好氧堆肥是一种绿色集成创新的技术手段,通过较低的投入、较高的产能、优良的环境效益,以及极高的经济效益,在工程领域得到应用,该技术不仅将畜禽粪便进行了安全的处置,还将其变为具有经济价值的功能性肥料,投加到种植地中,有效地减少了化肥的施用,并具有改善耕地质量的作用。此外,种植地的农副产品,还可以继续为畜禽养殖提供饲料,从而有助于推进农业资源利用循环化、废弃物资源化、产业模式生态化的进程。

表3 超高温好氧堆肥直接运行成本分析

Table 3 Direct operating costs of hyperthermophilic composting

成本组分 Cost component	单价/(元·t <sup>-1</sup> ) Unit price/(yuan·t <sup>-1</sup> )
电费(翻抛机+鼓风机)	10
物料费(超高温菌剂+蘑菇菌渣)	40
运输费	10
人工费	10~20
总计费用	70~80

## 6 结论与展望

(1)超高温好氧堆肥是一种绿色、高效的有机废物资源化利用技术,通过添加嗜嗜热微生物,能够大幅度提高堆肥发酵温度,降低堆肥发酵周期,增强有机废弃物资源化和无害化效果。

(2)在处理大规模畜禽粪便的工程应用中,利用槽式及条垛式的超高温好氧堆肥,最高温度可超过80℃,并在20~30d内完成堆肥过程,运行成本低。此外,腐熟料经过二次加工,可制备成具有较高经济价值的功能有机肥商品,产生较好的经济效益。

(3)超高温好氧堆肥技术已成功用于福清市畜禽粪污资源化利用整县推进项目,并形成可复制的畜禽粪便高效循环利用新模式。

(4)超高温好氧堆肥技术对各种有机固废均具有很好的处理效果,本文基于畜禽粪便超高温好氧堆肥工程案例进行分析,为农林残余、生活垃圾、厨房残余等其他有机固废的大规模集约化处置提供参考,以期实现有机固废的变废为宝,树立集约循环利用的资源观,促进资源的高效循环利用。

### 参考文献:

- [1] 江鹏翔. 规模化畜禽养殖场对环境污染的问题及对策[J]. 中国畜牧种业, 2021, 17(4): 102-103. JIANG P X. Problems and countermeasures of environmental pollution caused by large-scale livestock and poultry farms[J]. *The Chinese Livestock and Poultry Breeding*, 2021, 17(4): 102-103.
- [2] 刘晓水, 王秀斌, 李书田. 中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5723-5739. LIU X Y, WANG X B, LI S T. Livestock and poultry faeces nitrogen loading rate and its potential return to farmland in China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5723-5739.
- [3] 胡曾曾, 于法稳, 赵志龙. 畜禽养殖废弃物资源化利用研究进展[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 186-193. HU Z Z, YU F W, ZHAO Z L. Review of research on the utilization of livestock and poultry waste in China[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(8): 186-193.
- [4] 付龙, 张淑芬, 马珊珊, 等. 畜禽粪便资源化利用中存在的问题及建议[J]. 现代畜牧科技, 2021(9): 83-85. FU L, ZHANG S F, MA S S, et al. Problems and suggestions in the resource utilization of livestock and poultry manure[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2021(9): 83-85.
- [5] 余震, 周顺桂. 超高温好氧发酵技术: 堆肥快速腐熟与污染控制机制[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(5): 781-789. YU Z, ZHOU S G. Hyperthermophilic composting of organic solid wastes: Accelerated humification and pollution control mechanisms[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(5): 781-789.
- [6] CHEN Z, XING R Z, YANG X G, et al. Enhanced in situ Pb(II) pas-

- sivation by biotransformation into chloropyromorphite during sludge composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408:124973.
- [7] CHEN Z, ZHAO W Q, XING R Z, et al. Enhanced in situ biodegradation of microplastics in sewage sludge using hyperthermophilic composting technology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121271.
- [8] CUI P, CHEN Z, ZHAO Q, et al. Hyperthermophilic composting significantly decreases N<sub>2</sub>O emissions by regulating N<sub>2</sub>O-related functional genes[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272:433-441.
- [9] LIAO H P, LU X M, RENSING C, et al. Hyperthermophilic composting accelerates the removal of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in sewage sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(1):266-276.
- [10] YOSHII T, MORIYA T, OSHIMA T. Bacterial and biochemical properties of newly invented aerobic, high-temperature compost[M]//Dordrecht:Springer Netherlands, 2013:119-135.
- [11] 廖汉鹏, 陈志, 余震, 等. 有机固体废物超高温好氧发酵技术及其工程应用[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(4):439-444. LIAO H P, CHEN Z, YU Z, et al. Development of hyperthermophilic aerobic composting and its engineering applications in organic solid wastes[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2017, 46(4):439-444.
- [12] YUAN Y, TAO Y, ZHOU S G, et al. Electron transfer capacity as a rapid and simple maturity index for compost[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116:428-434.
- [13] 李淑杰. 畜禽粪便堆肥利用技术[J]. 吉林畜牧兽医, 2020, 41(12):103-105. LI S J. Compost utilization technology of livestock and poultry manure[J]. *Jilin Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2020, 41(12):103-105.
- [14] 陈绪涛, 戴朝阳, 孙鹏, 等. 添加油菜籽饼粕对茶树菇菌渣高温堆肥进程的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(2):60-64. CHEN X T, DAI C Y, SUN P, et al. Effect of rapeseed cake addition on high temperature compost process of *Agrocybe cylindracea* dreg[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(2):60-64.
- [15] 孟素香, 曹健. 极端微生物对极端环境的适应机理及应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2014(9):249-250. MENG S X, CAO J. Research progress of adaptation mechanism and application of extreme microbes toward extreme environment[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(9):249-250.
- [16] WANG L, LIN Y, YE L, et al. Microbial roles in dissolved organic matter transformation in full-scale wastewater treatment processes revealed by reactomics and comparative genomics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(16):11294-11307.
- [17] CÁCERES R, FLOTATS X, MARFÀ O. Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies[J]. *Waste Manage*, 2006, 26(10):1081-1091.
- [18] YU Z, TANG J H, LIAO H P, et al. The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant[J]. *Bioresource Technol*, 2018, 265:146-154.
- [19] CÁCERES R, MALIŃSKA K, MARFÀ O. Nitrification within composting: A review[J]. *Waste Manage*, 2018, 72:119-137.