

## 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析

刘燕, 马若男, 李国学, 袁京

引用本文:

刘燕, 马若男, 李国学, 等. 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 202-209.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0179>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 工厂化条件下外源添加剂对猪粪堆肥过程中 $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的减排效果

宋修超, 郭德杰, 成卫民, 罗佳, 徐焯红, 王光飞, 刘新红, 马艳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2014-2020 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0221>

### 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

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2405-2411 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1108>

### 含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 陈杰, 李施雨, 李国学, 罗文海

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2448-2455 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0980>

### 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>

### 磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价

赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 徐智

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2481-2488 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0558>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘燕, 马若男, 李国学, 等. 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 202-209.

LIU Y, MA R N, LI G X, et al. Economic benefit analysis of sludge composting plants based on the use of additives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 202-209.



开放科学 OSID

# 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析

刘燕, 马若男, 李国学, 袁京\*

(中国农业大学资源与环境学院农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 基于原位控制理念的外源添加剂可有效控制堆肥过程中污染气体的产生, 同时提高堆肥产品养分含量, 但其在工厂尺度应用的经济效益仍不明确。本文以内蒙古通辽市某污水处理厂为例, 对不同堆肥模式情景以及外源添加剂使用进行系统的经济效益分析。结果表明: 处理量较大的条垛式自然通风堆肥工艺(配套 WT36 型翻堆机)具有相对较低的基础设施投资费用和运行管理成本。不同堆肥工艺不添加外源材料的堆肥产品生产成本为 314.93~349.85 元·t<sup>-1</sup>; 使用磷石膏可使堆肥生产成本降低约 6 元·t<sup>-1</sup>; 磷石膏与双氰胺混合添加、仅使用过磷酸钙、过磷酸钙与双氰胺混合添加时生产成本升高 5.0%~16.2%。堆肥产品销售可以补偿污泥堆肥处理成本, 使污泥堆肥达到微利水平。采用大规模的条垛式自然通风且添加磷石膏的堆肥工艺经济效益最优, 产投比达到 3.22, 投资回收期最短, 可在 3 年 2 个月收回项目静态投资总额。因此, 以磷石膏为外源添加剂并采用大规模条垛式自然通风工艺的污泥堆肥工厂化应用具有经济可行性。

**关键词:** 污泥; 堆肥工艺; 添加剂; 成本分析; 经济效益

中图分类号: S141.4; X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)01-0202-08 doi:10.11654/jaes.2021-0179

## Economic benefit analysis of sludge composting plants based on the use of additives

LIU Yan, MA Ruonan, LI Guoxue, YUAN Jing\*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Exogenous additives based on the *in situ* control concept can effectively control the generation of pollution gases during the composting process, as well as improve the nutrient content of compost products; however, the economic benefits of its application at the factory scale are still unclear. Taking a sewage treatment plant in Tongliao City of Inner Mongolia as an example, this study systematically analyzed the economic benefits of different composting modes and the use of exogenous additives. The results showed that the strip stack natural ventilation composting process (with WT36 dumper) with a large capacity had relatively low infrastructure investment and operation and management costs. The production cost of compost products with different composting processes without adding exogenous additives ranged from 314.93 to 349.85 yuan · t<sup>-1</sup>. Using phosphogypsum reduced the production cost of composting by about 6 yuan · t<sup>-1</sup>; When phosphogypsum was mixed with dicyandiamide, only superphosphate was used, superphosphate was mixed with dicyandiamide, the production cost increased by 5.0%~16.2%. The sale of composting products compensated for the cost of sludge composting and made the sludge composting reach the level of low profit. Among them, the composting process with large-scale natural ventilation and adding phosphogypsum had the best economic benefit: the ratio of production to investment was 3.22, the investment recovery period was the shortest, and the total static investment of the project could be recovered in three years and two months. Therefore, the industrial application of sludge composting using phosphogypsum as an external additive and a large-scale heating and natural ventilation process is economically feasible.

**Keywords:** sewage sludge; composting pattern; additive; cost analysis; economic benefit

收稿日期: 2021-02-10 录用日期: 2021-07-09

作者简介: 刘燕(1993—), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 从事固体废物处理与资源化利用研究。E-mail: luya\_1993@163.com

\*通信作者: 袁京 E-mail: jingyuan@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1901000)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFC1901000)

随着我国城市化进程的加快及污水排放标准的日益严格,城镇污水处理量急剧增加。相关信息显示,目前我国已建成的生活污水处理厂超过6 263座,日处理规模达到8 865万 $t \cdot d^{-1}$ 。随之而来的城镇污水处理副产物——污泥的产量也大幅提升。截至2018年6月,全国城市湿污泥(含水率80%)年产量超过5 000万 $t$ (不含工业污泥)<sup>[2]</sup>。污泥成分复杂,含有多种微生物菌胶团以及有机物、无机物、重金属等,极易腐败并产生恶臭,如随意堆放会造成新的污染<sup>[3]</sup>。污泥堆肥技术是利用污泥中的好氧微生物对其进行发酵的技术,是实现污泥稳定化、无害化和减量化的有效途径。相关研究证实,城镇污泥经过高温好氧堆肥基本可以杀死全部病原菌、寄生虫和杂草种子,同时还可以降低污泥中重金属的有效性以及有毒有机污染物的浓度<sup>[4-5]</sup>。腐熟的污泥堆肥产品在合适的施用量下,可以大幅增强沙荒地的保肥能力,提高农产品的产量和品质,还能促进园林绿化中苗木和多种草皮的生长,且在花卉果树的种植中也起着非常积极的作用<sup>[6-7]</sup>。

在工程应用中,堆肥工艺可分为条垛式堆肥、静态强制通风堆肥、发酵槽(池)式堆肥和容器式堆肥4种。条垛式堆肥和发酵槽(池)式堆肥设备简单、投资相对较少且产量大,产品品质均匀稳定,目前已得到广泛应用。容器式堆肥工艺由于投资及运行成本较高、机械设备依赖性强、堆肥产品产量少、品质较不稳定等原因,普及度较低<sup>[8]</sup>。堆肥过程中,随着有机质降解,会产生大量有害气体和温室气体,目前普遍采用原位控制方式,通过添加外源添加剂来固定和减少污染气体排放。如堆肥过程中添加磷石膏可显著降低 $CH_4$ 和 $NH_3$ 的排放<sup>[9-12]</sup>;磷石膏与双氰胺联用可以同时起到降低 $CH_4$ 、 $NH_3$ 和 $N_2O$ 产生量的作用<sup>[9,11]</sup>。磷石膏作为添加材料还可以提高堆肥发酵强度,加快堆肥腐熟进程,增加最终产品的养分含量<sup>[13-15]</sup>。多项研究证实,堆肥过程不会因磷石膏的添加而带来重金属超标风险<sup>[13,15]</sup>。过磷酸钙的添加也可以有效降低 $CH_4$ 和

$NH_3$ 排放,与双氰胺联用还可显著降低 $N_2O$ 的排放<sup>[11,16]</sup>。

尽管外源添加材料有很好的减排效果,但在实际堆肥生产中几乎很少被采用,主要是因为外源添加剂增加了堆肥处理成本。根据以往研究,含磷添加剂不仅可以减少污染气体排放,同时也会固定碳和氮,进而增加堆肥产量。因此,堆肥产品的销售效益某种程度上可以补偿添加剂的购买成本。磷石膏是磷矿生产的一种废弃物,过磷酸钙也是我国常用的磷肥,这些含磷添加剂用于堆肥过程有多重效果,可以通过减少碳和氮损失,增加堆肥质量和品质,同时增加有机肥中磷含量。为了减少温室气体 $N_2O$ 排放,添加硝化抑制剂还可以实现污染气体的联合减排。但是,实际工厂化堆肥过程中采用添加剂的经济效益如何,目前尚未有相关文献资料进行系统的对比分析。因此,本文将结合具体实例,针对不同堆肥模式与不同添加剂组合方式进行系统的成本预算和经济效益分析,探讨不同的工厂化堆肥模式在实际运行中的可行性,从而为外源添加剂控制堆肥过程中污染气体的技术落地应用提供数据支撑。

## 1 污泥堆肥化处理基本概况

### 1.1 处理规模与工艺参数

以通辽市某污水处理厂为例,设定堆肥厂的脱水污泥处理量为 $150 t \cdot d^{-1}$ ,含水率为80%,即该堆肥厂每年处理脱水污泥54 000 $t$ 。将脱水污泥按85:15(鲜质量比)的比例与玉米秸秆混合堆肥,则需要玉米秸秆辅料约9 500 $t$ ,混合物料处理量即为63 500 $t$ 。此堆肥工艺配比已经过试验论证,可获得较好的堆肥发酵温度和产品腐熟度<sup>[17]</sup>。混合物料密度为 $0.6 t \cdot m^{-3}$ ,折合物料体积为105 840 $m^3$ 。设定的堆肥相关工艺参数如表1所示。每批物料在一个堆肥周期内的总翻堆次数 $f=35 \div 7 \times 2=10$ (次)。

### 1.2 堆肥工艺与基础设备

本研究采用条垛式和槽式两种堆肥工艺。以3

表1 堆肥相关基础参数

Table 1 Compost related basic parameters

污泥 Sewage sludge		玉米秸秆 Corn stalk		混合物料 Mixed material		污泥:玉米秸秆 Sludge: Corn stover <sup>a</sup>	堆肥周期 Composting cycle/d	翻堆频率 Turnover frequency/ (time $\cdot$ week <sup>-1</sup> )
干物质 Dry matter/%	体积密度 Bulk density/( $t \cdot m^{-3}$ )	干物质 Dry matter/%	体积密度 Bulk density/( $t \cdot m^{-3}$ )	干物质 Dry matter/%	体积密度 Bulk density/( $t \cdot m^{-3}$ )			
20.0	0.8	90.0	0.1	30.5	0.6	85:15	35	2

注:a 基于鲜质量。

Note:a Based on fresh weight.

种常用的堆肥翻堆机为基础设备,型号分别为WT28、WT36和LT30。其中,WT28与WT36适用于条垛式堆肥,LT30适用于较大规模的槽式堆肥。共设定3种不同的情景模式。情景I:采用条垛式自然通风堆肥工艺,使用WT28型翻堆机;情景II:采用条垛式自然通风堆肥工艺,使用WT36型翻堆机;情景III:采用槽式自然通风堆肥工艺,使用LT30型翻堆机。不同翻堆机型号和基本工作参数见表2。物料进场和堆肥成品转移需要配备液压铲车,基本参数为:柴油动力,平均工作油耗15 L·h<sup>-1</sup>,铲斗容积1.5 m<sup>3</sup>,处理能力50 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

## 2 基础设施投资

污泥堆肥化处理环节中,无论采用何种堆肥工艺、何种基础设备型号,都需要一定的基础设施投资。基础设施投资又分为构筑物投资和设备投资,主要涉及堆肥设施所需要的占地面积。

### 2.1 设施基本情况

本研究中堆肥作业区设计主要包括原料场、堆肥车间和产品间,均采用水泥硬化地面、防雨顶棚以及卷帘活动墙为主体的侧面墙体。假设在3个不同的堆肥情景模式下,堆肥产品的年生产量与使用或销售量持平,产品间堆肥成品的最长库存时间为6个月。

#### 2.1.1 情景I

情景I采用条垛式自然通风堆肥工艺,使用WT28型翻堆机。该型号翻堆机成垛体积较小,冬季保温效果较差,每年作业时间设计为8个月(11月至次年2月暂停生产堆肥)。该情景下脱水污泥平均日产体积约为180 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,则4个月脱水污泥总产量约为21 600 m<sup>3</sup>。按原料平均堆高1.5 m计算,则污泥原料场占地面积需14 400 m<sup>2</sup>。玉米秸秆辅料二次污染较小,可场外存放,此处不计入原料场建设面积。全

年处理堆肥原料总体积105 840 m<sup>3</sup>,堆肥车间内处于堆制过程中的最大物料量 $V_{\text{作业}}$ 可按公式(1)计算,则堆肥车间作业区物料最大总体积为15 182 m<sup>3</sup>。

$$V_{\text{作业}} = \frac{D_{\text{周期}}}{D_{\text{作业}}} \times V_{\text{总}} \quad (1)$$

式中: $D_{\text{作业}}$ 为全年工作总天数,本情景中堆肥设施全年作业时间按8个月计算,即 $D_{\text{作业}}=244$  d; $D_{\text{周期}}$ 为一个堆肥周期天数,本研究中 $D_{\text{周期}}=35$  d; $V_{\text{总}}$ 为全年处理物料总体积,本研究中 $V_{\text{总}}=105 840$  m<sup>3</sup>。

堆肥车间作业区占地面积 $A_{\text{作业区}}$ 依照公式(2)计算,则占地面积为24 457 m<sup>2</sup>,条垛数为85个。

$$A_{\text{作业区}} = \frac{V_{\text{作业}}}{v} \div L \times w \times (L + l_{\text{位移}} + 2l_{\text{转向}}) \quad (2)$$

式中: $v$ 为翻堆机最大工作体积,m<sup>3</sup>·m<sup>-1</sup>;L为推荐单踪(槽)长度,本情景中堆肥作业区推荐单垛长度为102 m,即 $L=102$  m; $w$ 为单垛(槽)工作宽度,m; $l_{\text{位移}}$ 为单程翻堆移位距离,m; $l_{\text{转向}}$ 为翻堆机转向所需空间距离,m。 $v$ 、 $w$ 、 $l_{\text{位移}}$ 和 $l_{\text{转向}}$ 取值见表2。

按堆肥过程体积减量化率为50%计算,全年共生产堆肥产品总量约52 920 m<sup>3</sup>。按最长库存时间6个月,堆放高度3 m计算,则产品库存最大占地面积约8 820 m<sup>2</sup>。

因此,情景I中原料场、堆肥车间和产品间合计最大占地面积为47 677 m<sup>2</sup>。以上3类场区可建成统一制式的车间,进一步节省占地面积。即情景I条件下,堆肥设施总建筑面积可设计为47 500 m<sup>2</sup>。

#### 2.1.2 情景II

情景II采用条垛式自然通风堆肥工艺,使用WT36型翻堆机。该型号翻堆机成垛体积较大,堆肥设施可实现全年作业。该情景下可实现进料直接堆肥,无原料场。全年处理堆肥原料总体积105 840 m<sup>3</sup>,本情景条件下,作业时间为360 d。依照公式(1),可计算得出堆肥车间内处于堆制过程中的最大物料

表2 不同情景堆肥翻堆机基础参数

Table 2 Basic parameters of compost turning machine in different scenarios

情景 Scenario	型号 Model	处理能力 Processing capacity/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	动力 Power	平均能耗 Average energy consume	最大工作 体积( $v$ ) Maximum volume/ (m <sup>3</sup> ·m <sup>-1</sup> )	单垛(槽)工作 宽度( $w$ ) Working width/m	单程移位 距离( $l_{\text{位移}}$ ) One-way shift distance/m	转向空间 距离( $l_{\text{转向}}$ ) Turning space distance/m
I	WT28	250	柴油	10 L·h <sup>-1</sup>	1.9	2.8	1.5	4.0
II	WT36	750	柴油	15 L·h <sup>-1</sup>	3.2	3.6	2.0	4.5
III	LT30	400	电能	100 kW	5.4	3.3 <sup>a</sup>	2.0	8.0

注:a 包含堆槽单面墙体宽度。

Note:a Contains the width of the single-sided wall of the stack.

量为10 290 m<sup>3</sup>。堆肥作业区推荐单垛长度为102 m,根据公式(2),并结合表2中翻堆机的工作参数,计算出该堆肥设施作业区占地面积为12 824 m<sup>2</sup>,设计条垛数应为35个。产品间占地面积与情景 I 相同,为8 820 m<sup>2</sup>。

因此,情景 II 中原料场、堆肥车间和产品间合计最大占地面积为21 644 m<sup>2</sup>。考虑到无原料场,堆肥设施总建筑面积可设计为22 000 m<sup>2</sup>。

### 2.1.3 情景 III

情景 III 采用槽式自然通风堆肥工艺,使用LT30型翻堆机,全年作业。该型号翻堆机成本相对较高,适用于年处理规模5万t的自动化堆肥厂。该情景下可实现进料直接堆肥,无原料场。最大物料量与情景 II 相同,为10 290 m<sup>3</sup>。堆肥作业区推荐单槽长度为100 m,根据公式(2),并结合表2中翻堆机的工作参数,可计算得出该堆肥设施作业区占地面积为7 420 m<sup>2</sup>,设计堆槽数应为22个。产品间占地面积与情景 I 和 II 相同,为8 820 m<sup>2</sup>。

因此,情景 III 中原料场、堆肥车间和产品间合计

最大占地面积为16 240 m<sup>2</sup>,堆肥设施总占地面积可设计为16 000 m<sup>2</sup>。此外,堆肥车间需建设堆肥槽,22个堆槽共需侧墙23面,长度设计为100 m+2 m=102 m,宽度0.3 m,高度2.2 m。则侧墙单面总面积为23×102 m×2.2 m=5 161 m<sup>2</sup>。因此还需建设堆槽侧墙共5 000 m<sup>2</sup>。

### 2.2 设施投资估算

3种不同情景的基础设施投资如表3所示(未计土地使用费)。构筑物投资包括地面、房顶、活动墙面以及情景 III 中的堆槽侧墙投资等。各类构筑物单价均通过市场询价确定。设备投资包括购买翻堆机、添加剂自动加药装置及铲车所需的成本。其中,3种不同情景下所需的翻堆机数量由物料体积、翻堆机处理能力及实际情况共同决定,添加剂自动加药装置的数量根据翻堆机数量而定。3种不同情景均配备6台铲车,供物料进场和堆肥成品转移所用。各类设备单价均通过市场询价确定。

3个不同情景下的一次性基础设施投资分别为1 512.8万元、1 065.2万元和1 088.4万元。混合初始物料鲜质量为63 500 t,建筑和构筑物折旧年限按10

表3 不同情景堆肥基础设施投资费用

Table 3 Composting infrastructure investment costs in different scenarios

情景 Scenario	项目 Project	单价 Price	面积/件数 Area/Number	合计成本/万元 Total cost/10 <sup>4</sup> yuan	
I	构筑物 Structure	地面硬化 Ground hardening	100元·m <sup>-2</sup>	47 500 m <sup>2</sup>	475
		房顶 Roof	100元·m <sup>-2</sup>	47 500 m <sup>2</sup>	475
		活动墙面及其他 Movable wall and other	30万元·件 <sup>-1</sup>	6件	180
	设备 Equipment	翻堆机 WT28 Stacker WT28	25万元·件 <sup>-1</sup>	9件	225
		添加剂自动加药装置 Additive automatic dosing device	4.2万元·件 <sup>-1</sup>	9件	37.8
		铲车 Shovel car	20万元·件 <sup>-1</sup>	6件	120
		合计 Total			1 512.8
II	构筑物 Structure	地面硬化 Ground hardening	100元·m <sup>-2</sup>	22 000 m <sup>2</sup>	220
		房顶 Roof	100元·m <sup>-2</sup>	22 000 m <sup>2</sup>	220
		活动墙面及其他 Movable wall and other	30万元·件 <sup>-1</sup>	4件	120
	设备 Equipment	翻堆机 WT36 Stacker WT36	60万元·件 <sup>-1</sup>	6件	360
		添加剂自动加药装置 Additive automatic dosing device	4.2万元·件 <sup>-1</sup>	6件	25.2
		铲车 Shovel car	20万元·件 <sup>-1</sup>	6件	120
		合计 Total			1 065.2
III	构筑物 Structures	地面硬化 Ground hardening	100元·m <sup>-2</sup>	16 000 m <sup>2</sup>	160
		房顶 Roof	100元·m <sup>-2</sup>	16 000 m <sup>2</sup>	160
		堆槽墙面 Pile trough wall	200元·m <sup>-2</sup>	5 000 m <sup>2</sup>	100
		活动墙面及其他 Movable wall and other	30万元·件 <sup>-1</sup>	3件	90
	设备 Equipment	翻堆机 LT30 自动传送控制系统 Automatic transfer control system of stacker LT30	450万元·件 <sup>-1</sup>	1件	450
		添加剂自动加药装置 Additive automatic dosing device	4.2万元·件 <sup>-1</sup>	2件	8.4
		铲车 Shovel car	20万元·件 <sup>-1</sup>	6件	120
		合计 Total			1 088.4

a 计算,则单位处理规模基础设施投资(鲜基)分别为 23.8、16.8 元·t<sup>-1</sup> 和 17.1 元·t<sup>-1</sup>。

### 3 运行管理成本

运行管理成本主要包括生产能源消耗、员工薪酬、堆肥辅料成本、添加材料成本、维修与维护费用、保险费、设施折旧费以及利率差等<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 生产能源消耗

堆肥设施能源消耗主要涉及翻堆机和铲车等设备耗能(表2)。本研究柴油和电力单价参照2020年市场平均价,其中柴油价格为5.6元·L<sup>-1</sup>,工商业用电平均价格为0.7元·kWh<sup>-1</sup>。

铲车主要用于物料进、出堆肥车间,以及堆肥过程中必要的物料整理,总处理体积设定为堆肥年进料总量的2倍(堆肥减量化率为50%条件下,进、出料总量为进料量的1.5倍,其余日常少量的物料整理处理量按进料量的0.5倍估算)。则3种情景下堆肥设备能耗如表4所示。计算出3种情景下的设备能源年消耗成本分别为59.27万元、47.41万元和54.08万元。

#### 3.2 人力与管理成本

堆肥设施所需人工按照堆肥设备操作与管理时间计算。以情景I为例,由表4可知,翻堆机工作时长为4 233.6 h·a<sup>-1</sup>,一年按175个工作日计算,平均工

作时间为24.2 h·d<sup>-1</sup>;同样,铲车平均工作时间也为24.2 h·d<sup>-1</sup>;此外,日常堆肥过程监控需要3 h·d<sup>-1</sup>,则平均所需总工作时长为52 h·d<sup>-1</sup>。工作人员日工作时长按8 h·d<sup>-1</sup>计算,则需要7个工作人员来满足情景I设施的日常操作与管理。以此类推,情景II与情景III一年运行12个月按250个工作日计算,则工作时长情况如表5所示。北京市人力资源和社会保障局公布的北京地区2019年职工月平均工资为8 850元,则3个不同情景条件下的人力成本分别为49.56万元·a<sup>-1</sup>、42.48万元·a<sup>-1</sup>和42.48万元·a<sup>-1</sup>。

#### 3.3 设施折旧费和利率差

折旧费包括设备折旧、建筑和构筑物折旧以及利率差。本研究设备折旧年限设为5 a,建筑和构筑物折旧年限设为10 a,年利率按总投资的3.5%计算。

表6 不同情景堆肥设施折旧费和利率差(万元·a<sup>-1</sup>)  
Table 6 Depreciation fee and interest rate difference of composting facilities in different scenarios (10<sup>4</sup> yuan·a<sup>-1</sup>)

情景 Scenario	设备折旧 Equipment depreciation	构筑物折旧 Structure depreciation	利率差 interest rate spread	合计成本 Total cost
I	76.56	113.00	52.95	242.51
II	101.04	56.00	37.28	194.32
III	115.68	51.00	38.09	204.77

表4 不同情景堆肥生产能耗成本

Table 4 Energy cost of compost production in different scenarios

情景 Scenario	设备 Equipment	处理量 Processing capacity/(m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )	工作时间 Working hour/(h·a <sup>-1</sup> )	柴油/电力消耗 Diesel/electricity consumption	能源成本/(万元·a <sup>-1</sup> ) Energy cost/(10 <sup>4</sup> yuan·a <sup>-1</sup> )
I	翻堆机 Stacker	1 058 400	4 233.6	42 336 L·a <sup>-1</sup>	23.71
	铲车 Shovel car	211 680	4 233.6	63 504 L·a <sup>-1</sup>	35.56
	合计 Total	—	—	—	59.27
II	翻堆机 Stacker	1 058 400	1 411.2	21 168 L·a <sup>-1</sup>	11.85
	铲车 Shovel car	211 680	4 233.6	63 504 L·a <sup>-1</sup>	35.56
	合计 Total	—	—	—	47.41
III	翻堆机 Stacker	1 058 400	2 646.0	264 600 kWh·a <sup>-1</sup>	18.52
	铲车 Shovel car	211 680	4 233.6	63 504 L·a <sup>-1</sup>	35.56
	合计 Total	—	—	—	54.08

表5 不同情景人力与管理成本

Table 5 Manpower and management costs in different scenarios

情景 Scenario	翻堆机工作时长 Stacker working hour/ (h·d <sup>-1</sup> )	铲车工作时长 Shovel car working hour/ (h·d <sup>-1</sup> )	监控时长 Monitoring time/ (h·d <sup>-1</sup> )	总工作时长 Total working hour/ (h·d <sup>-1</sup> )	人员数量 Number of personnel	合计成本/(万元·a <sup>-1</sup> ) Total cost/ (10 <sup>4</sup> yuan·a <sup>-1</sup> )
I	24.2	24.2	3.0	51.4	7	49.56
II	22.6	0	3.0	25.6	4	42.48
III	27.5	0	0	27.5	4	42.48

依照表3的基础设施投资,3种不同情景的折旧成本计算结果见表6。不同情景设施折旧费分别为242.51万元·a<sup>-1</sup>、194.32万元·a<sup>-1</sup>和204.77万元·a<sup>-1</sup>。

### 3.4 添加材料成本

不使用添加材料或使用不同的添加材料组合,其成本会大有不同。根据2020年添加材料市场价,磷石膏单价按200元·t<sup>-1</sup>、过磷酸钙单价按500元·t<sup>-1</sup>、双氰胺单价按12元·kg<sup>-1</sup>计算。磷石膏、过磷酸钙添加量以初始物料湿质量的3%计,双氰胺添加量以初始物料干质量的0.2%计,初始物料湿质量及干物质含量见1.1小节。3种情景具有相同的堆肥初始物料条件,若仅添加磷石膏,则添加材料成本均为38.10万元·a<sup>-1</sup>;若仅添加过磷酸钙,则添加材料成本均为95.25万元·a<sup>-1</sup>;若同时添加磷石膏和双氰胺,则添加材料成本均为84.58万元·a<sup>-1</sup>;若同时添加过磷酸钙和双氰胺,则添加材料成本均为141.73万元·a<sup>-1</sup>。

### 3.5 其他费用

其他费用包括堆肥辅料成本、维修与维护费和保

表7 不同情景堆肥其他成本(万元·a<sup>-1</sup>)

Table 7 Composting of other costs in different scenarios (10<sup>4</sup> yuan·a<sup>-1</sup>)

情景 Scenario	玉米秸秆 Corn stalk	维修与维护 Repair and maintenance	保险费 Insurance fee	合计 Total cost
I	190.00	38.28	15.13	243.41
II	190.00	50.52	10.65	251.17
III	190.00	57.84	10.88	258.72

表8 使用不同添加材料条件下的运行管理总成本及单位生产成本

Table 8 The total cost of operation management and unit production cost under the condition of using different added materials

情景 Scenario	成本 Cost	无添加剂 No additive	磷石膏 Phosphogypsum	过磷酸钙 Superphosphate	磷石膏+双氰胺 Phosphogypsum + Dicyandiamide	过磷酸钙+双氰胺 Superphosphate + Dicyandiamide
I	总成本/(万元·a <sup>-1</sup> ) Total cost/(10 <sup>4</sup> yuan·a <sup>-1</sup> )	594.75	632.85	690.00	679.33	736.48
	生产成本/(元·t <sup>-1</sup> ) Cost of production/(yuan·t <sup>-1</sup> )	349.85	342.08	372.97	367.21	398.10
II	总成本/(万元·a <sup>-1</sup> ) Total cost/(10 <sup>4</sup> yuan·a <sup>-1</sup> )	535.38	573.48	630.63	619.96	677.11
	生产成本/(元·t <sup>-1</sup> ) Cost of production/(yuan·t <sup>-1</sup> )	314.93	309.99	340.88	335.11	366.01
III	总成本/(万元·a <sup>-1</sup> ) Total cost/(10 <sup>4</sup> yuan·a <sup>-1</sup> )	560.05	598.15	655.30	644.63	701.78
	生产成本/(元·t <sup>-1</sup> ) Cost of production/(yuan·t <sup>-1</sup> )	329.44	323.32	354.22	348.45	379.34

注:磷石膏、过磷酸钙添加量以初始物料湿质量的3%计,双氰胺添加量以初始物料干质量的0.2%计。下同。

Note: The addition amount of phosphogypsum and superphosphate is calculated based on 3% of the fresh amount of the initial material, and the added amount of dicyandiamide is calculated based on 0.2% of the dry mass of the initial material. The same below.

险费等。本研究中堆肥辅料秸秆成本(含运费)按200元·t<sup>-1</sup>计算;每年维修维护费按设备费的10%计算;每年保险费为基础设施总投资的1%。以上几项其他费用计算结果见表7。3种不同情景下的其他费用分别为243.41万元·a<sup>-1</sup>、251.17万元·a<sup>-1</sup>和258.72万元·a<sup>-1</sup>。

### 3.6 运行管理总成本及单位生产成本

综合以上运行与管理成本,3种堆肥情景分别使用不同添加材料时的运行管理总成本及单位生产成本如表8所示。在使用相同添加材料条件下,3种堆肥情景运行与管理总成本由高到低排序为:情景I>情景III>情景II。

初始混合物料总量为63 500 t·a<sup>-1</sup>,干物质含量为30.5%。堆肥后总干物质质量(磷石膏或过磷酸钙等添加剂除外)损失率为40%,产品含水率为30%,添加剂基本无质量损失。则使用添加剂时堆肥产品年产量为18 500 t·a<sup>-1</sup>,不使用添加剂时堆肥产品年产量为17 000 t·a<sup>-1</sup>。

与不使用添加材料相比,仅使用磷石膏作为添加材料时堆肥产品生产成本降低6元·t<sup>-1</sup>左右。如前言所述,这主要是由于磷石膏本身就是磷矿生产过程中的废弃物,成本较低,并且在堆肥过程中基本没有质量损失,从而增加了堆肥产品总产量。此外,磷石膏较低的pH值还会在不影响堆肥品质的情况下,抑制堆肥有机质的降解,增加堆肥产品的产量,同时仍可以获得较好的腐熟度和养分含量,这也会降低生产成本<sup>[11-12]</sup>。磷石膏与双氰胺混合添加时生产成本升高

5.0%~6.4%;仅使用过磷酸钙时生产成本升高6.6%~8.2%;过磷酸钙与双氰胺混合添加时生产成本升高13.8%~16.2%。

总体来看,本研究中堆肥产品生产成本为309.99~398.10元·t<sup>-1</sup>,以采用条垛式堆肥、使用WT36翻堆机以及仅磷石膏作为添加剂条件下的生产成本最低。实际生产中还可以通过加强设施维护来延长折旧时间,降低折旧成本,进一步实现降低堆肥生产成本的目的。

#### 4 经济效益

不同情景及添加材料条件下,项目运行寿命期内的静态投资总额、投入产出比及投资回收期如表9所示。堆肥建筑和构筑物折旧年限为10 a,因此项目全部运行寿命期按10 a(自项目投产年开始算起)计算。假设堆肥产品的年销售量与年生产量持平,市场销售价格按1 000元·t<sup>-1</sup>计算,则不使用及使用添加材料条件下,项目10 a运行寿命期内的堆肥产品总收益分别为17 000万元和18 500万元。

项目的投入产出比 $R$ (通常用 $1/N$ 表示)可按公式(3)计算。单位投资所产生的经济效益, $N$ 值越大,则项目经济性越好。

$$R = \frac{K}{IN} = \frac{1}{N} \quad (3)$$

式中: $K$ 为静态投资总额; $IN$ 为项目寿命期内堆肥产品的总收益。

可以看出,堆肥产品销售可以补偿污泥堆肥化处理成本,使污泥堆肥达到微利水平。不同堆肥情景及添加材料条件下的 $N$ 值差别较小(表9),即投入1元

成本最高可获得3.22元的经济效益,最低可获得2.52元的经济效益,以情景II仅添加磷石膏模式下的经济效益最高。

由于项目建成投产后每年的产品收益均相同,则静态投资回收期 $P_t$ (自项目投产年开始算起)可按公式(4)计算,计算结果见表9。

$$P_t = \frac{K}{A} \quad (4)$$

式中: $K$ 为静态投资总额; $A$ 为每年的产品收益。

可以看出,污泥堆肥化处理最快可在3年2个月后收回项目静态投资总额,最慢也可在4年后收回项目静态投资总额。其中,情景II条件下无添加剂模式与仅添加磷石膏模式均能较快收回静态投资总额。

#### 5 结论

(1)年处理脱水污泥量为54 000 t的堆肥厂在3种堆肥情景下的一次性基础设施投资费分别为1 512.8万元、1 065.2万元和1 088.4万元,年运行与管理总成本介于535.38万元·a<sup>-1</sup>~736.48万元·a<sup>-1</sup>。其中,情景II采用条垛式自然通风堆肥工艺以及处理量较大的WT36型翻堆机,具有相对较低的基础设施投资费用和运行管理成本。

(2)不同堆肥工艺未添加外源材料的堆肥产品生产成本为314.93~349.85元·t<sup>-1</sup>。仅添加磷石膏可使堆肥产品生产成本降低约6元·t<sup>-1</sup>。磷石膏与双氰胺混合添加使生产成本升高5.0%~6.4%,仅使用过磷酸钙使生产成本升高6.6%~8.2%,过磷酸钙与双氰胺混合添加使生产成本升高13.8%~16.2%。

表9 不同情景及添加材料条件下项目运行寿命期内的静态投资总额、投入产出比及投资回收期

Table 9 The total static investment, input-output ratio, and investment payback period during the operating life of the project under different scenarios and added materials

情景 Scenario	项目 Item	无添加剂 No additive	磷石膏 Phosphogypsum	过磷酸钙 Superphosphate	磷石膏+双氰胺 Phosphogypsum + Dicyandiamide	过磷酸钙+双氰胺 Superphosphate + Dicyandiamide
I	静态投资总额/万元 Static total investment/10 <sup>4</sup> yuan	5 947.5	6 328.5	6 900.0	6 793.3	7 364.8
	$N$ 值 $N$ value	2.86	2.92	2.68	2.72	2.52
	投资回收期 Payback period/a	3.5	3.4	3.7	3.7	4.0
II	静态投资总额/万元 Static total investment/10 <sup>4</sup> yuan	5 353.8	5 734.8	6 306.3	6 199.6	6 771.1
	$N$ 值 $N$ value	3.18	3.22	2.94	2.98	2.74
	投资回收期 Payback period/a	3.1	3.1	3.4	3.4	3.7
III	静态投资总额/万元 Static total investment/10 <sup>4</sup> yuan	5 600.5	5 981.5	6 553.0	6 446.3	7 017.8
	$N$ 值 $N$ value	3.04	3.10	2.82	2.86	2.64
	投资回收期 Payback period/a	3.3	3.2	3.5	3.5	3.8

(3)堆肥产品销售可以补偿污泥堆肥化处理成本,使污泥堆肥达到微利水平。其中,采用大规模的条垛式自然通风且添加磷石膏的堆肥工艺经济效益最优,投资回收期最短(3年2个月),产投比最高(3.22)。

#### 参考文献:

- [1] 徐敏, 王东, 马乐宽, 等. 关于城镇污水处理厂进水浓度低及污水处理率修正的相关问题探讨[J]. 环境保护, 2020, 48(5):38-42. XU M, WANG D, MA L K, et al. Discussion on the problems related to the low influent concentration of urban sewage treatment plant and the correction of sewage treatment rate[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(5):38-42.
- [2] 王艳语, 苗俊艳, 侯翠红, 等. 城市污泥热解及其固体残渣资源化利用[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(12):41-45. WANG Y Y, MIAO J Y, HOU C H, et al. Pyrolysis of municipal sludge and utilization of its solid residues[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2020, 49(12):41-45.
- [3] 宿翠霞, 王龙波, 李凌霄, 等. 城镇污水处理厂污泥处置与资源化利用[J]. 中国资源综合利用, 2010, 28(5):50-52. SU C X, WANG L B, LI L X, et al. Sludge handling and reuse into resources in sewage treatment plant[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2010, 28(5):50-52.
- [4] 李敏. 污泥好氧堆肥技术及其应用[J]. 智能城市, 2020, 6(1):131-132. LI M. Sludge aerobic composting technology and its application[J]. *Intelligent City*, 2020, 6(1):131-132.
- [5] 刘峰, 蔡红, 刘英. 城市污泥农用存在的问题与对策[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17):304-309. LIU F, CAI H, LIU Y. Limiting factors and countermeasures for agricultural use of sewage sludge[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):304-309.
- [6] 杨桐桐, 封莉, 张立秋. 城市污泥堆肥产品施用对沙荒地土壤理化性质及高羊茅生长的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4):2462-2468. YANG T T, FENG L, ZHANG L Q. Effects of application of composted municipal sludge on physicochemical properties of desert land soil and growth of tall fescue[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4):2462-2468.
- [7] 陈桂梅, 刘善江, 张定媛, 等. 污泥堆肥的应用及其在农业中的发展趋势[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24):301-306. CHEN G M, LIU S J, ZHANG D Y, et al. Application and development of sewage sludge compost in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(24):301-306.
- [8] 牛国祥, 朱豪, 姚雨伽, 等. 污泥堆肥工艺及其应用前景[J]. 广东化工, 2020, 47(11):142-143. NIU G X, ZHU H, YAO Y J, et al. Sludge composting process and application prospect[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(11):142-143.
- [9] LUO Y M, LI G X, LUO W H, et al. Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions during composting[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7):1338-1345.
- [10] YANG F, LI G X, SHI H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36:70-76.
- [11] YUAN J, LI Y, CHEN S L, et al. Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270:368-376.
- [12] LI Y, LUO W H, LI G X, et al. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250:53-59.
- [13] 徐智, 张勇, 陈雪娇, 等. 稻壳-鸡粪好氧高温堆肥体系中磷石膏消纳能力的研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1):208-213. XU Z, ZHANG Y, CHEN X J, et al. Processing capacity of phosphogypsum in rice husk-chicken manure high-temperature composting system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(1):208-213.
- [14] 陈雪娇, 王宇蕴, 徐智, 等. 不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5):1001-1008. CHEN X J, WANG Y Y, XU Z, et al. Effect of phosphogypsum addition on the rice husk and oil cake composting process and evaluation of its physicochemical character as a substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5):1001-1008.
- [15] 赵兵, 王宇蕴, 陈雪娇, 等. 磷石膏和石膏对稻壳与油枯堆肥的影响及基质化利用评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10):2481-2488. ZHAO B, WANG Y Y, CHEN X J, et al. Effect of phosphogypsum and gypsum as conditioners on rice husk and oil cake composting process and evaluation of their physicochemical character as a substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2481-2488.
- [16] 陈是吏, 袁京, 李国学, 等. 过磷酸钙和双氰胺联用减少污泥堆肥温室气体及 $\text{NH}_3$ 排放[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6):199-206. CHEN S L, YUAN J, LI G X, et al. Combination of superphosphate and dicyandiamide decreasing greenhouse gas and  $\text{NH}_3$  emissions during sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(6):199-206.
- [17] 袁京, 何胜洲, 李国学, 等. 添加不同辅料对污泥堆肥腐熟度及气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):241-246. YUAN J, HE S Z, LI G X, et al. Effects of different additives on evaluation of maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):241-246.
- [18] 付艳. 污水处理系统成本统计探究[J]. 科技信息, 2013(26):473-475. FU Y. Cost statistics of sewage treatment system[J]. *Science & Technology Information*, 2013(26):473-475.