

厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣中试共堆肥系统效果评估

沈伟航¹, 宋亦心², 曹俊¹, 叶脉^{1*}, 朱能武³

(1. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150038; 3. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要:为解决厨余垃圾等有机废弃物处理难的问题, 该研究以厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣为主要原料, 通过控制通风方式和菌种类型在堆肥成套设备内开展中试好氧堆肥, 选取温度、含水率、碳氮比(C/N)、总养分、有机质含量、种子发芽指数和卫生学特性等指标评估共堆肥系统的技术可行性和经济可行性。结果表明: 选择间歇式通风方式并按质量分数1%投加复配菌剂, 堆肥在65℃以上高温持续7d; 经10d发酵, 物料含水率和C/N分别从63.5%和31.5降至30.1%和9.6; 堆肥产物的总养分(9.8%, 质量分数, 下同)和有机质含量(43%)均远高于NY/T 525—2021农业行业标准(总养分≥4%, 有机质含量≥30%); 堆肥产物腐熟度和卫生学特性状况良好, 种子发芽指数达88.3%, 粪大肠菌群数<3个/g, 产物中未发现蛔虫卵。该共堆肥系统的废物平均处置成本低至(248.67±19.89)元/t。研究结果可为实现厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣的低成本、规模化处理, 有效解决厨余等有机废弃物环境污染问题提供参考依据。

关键词: 堆肥; 通风; 废弃物处理; 厨余垃圾; 茶叶渣

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.026

中图分类号: X712

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0216-08

沈伟航, 宋亦心, 曹俊, 等. 厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣中试共堆肥系统效果评估[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 216-223. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.026 <http://www.tcsae.org>

Shen Weihang, Song Yixin, Cao Jun, et al. Evaluating co-composting of kitchens, greening wastes, and exhausted tea on a pilot scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 216-223. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.026 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国厨余垃圾产量巨大, 其有机物含量多, 易腐易臭, 处理不当会对环境造成严重影响, 厨余垃圾饲料化、昆虫养殖、堆肥、能源转化和高值化利用等资源化利用技术是其未来的主要发展趋势^[1], 其中好氧堆肥是一种简便有效、成本较低、应用较为广泛成熟的厨余垃圾资源化利用技术。然而, 厨余垃圾单独好氧堆肥存在诸如渗滤液和恶臭气体排放、堆肥周期长、堆肥产物腐熟度和卫生学特性状况欠佳等弊端^[2-4]。国内外学者对厨余垃圾与其他有机废弃物的共堆肥效果进行了一些研究, 邹德勋等^[5]将菌糠和厨余垃圾进行联合好氧堆肥, 结果表明菌糠可促进厨余垃圾的好氧堆肥、降低混合堆料产生的臭气量, 并得到发芽指数为55.6%的一次堆肥产品; 张红玉^[6]对厨余垃圾、猪粪和秸秆联合堆肥的腐熟度进行评价, 结果表明保持猪

粪和秸秆的原料配比在2:1~3:1, 并添加约50%的厨余垃圾进行联合堆肥能达到理想的腐熟效果; Tosun等^[7-8]分别研究了厨余垃圾与玫瑰花种植废弃物、厨余垃圾与污泥的共堆肥工艺效果; Lhadi等^[9]研究了厨余垃圾和畜禽粪便共堆肥过程中有机物迁移变化规律。可以看出, 已有的多数文献基本都是在厨余垃圾和其他废弃物联合堆肥工艺、物料转化等方面进行的研究^[10], 对于厨余垃圾和绿化废弃物、茶叶渣等有机废弃物共堆肥研究较少, 尤其缺少从技术可行性与经济可行性方面系统评价厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣共堆肥效果的中试研究。通风方式和菌剂添加是影响堆肥技术可行性和经济可行性的关键因素。沈玉君等^[11]学者的研究表明优化通风方式可显著降低猪粪堆肥过程中的氨气、硫化氢、总挥发性有机物、二甲二硫、二甲三硫等主要臭气物质排放浓度; 王友玲等^[12]以牛粪等有机废弃物为主要堆肥原料研究揭示了不同通风方式对好氧堆肥过程中氮素转化及损失的影响; 李旭东^[13]通过微生物菌剂复配和蓬松剂的组合可显著提升堆肥效率和植物栽培效果。

本研究以厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣为主要原料, 通过优化菌种类型、供气方式等工艺参数条件, 在堆肥成套设备内协同控制好氧堆肥过程, 在中试层面同步实现厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣的有效处理和精制有机肥的制备, 研究选取好氧堆肥特征指标来系统表征和论证厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣共堆肥的技术

收稿日期: 2021-11-01 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 广东省环保专项资金项目(粤财资环〔2022〕18号); 广东省财政厅经费资助(2022-GD-6); 粤港澳生态环境科学中心建设(2021-2022年)(XMHT-2021-ZG-KY067)

作者简介: 沈伟航, 工程师, 研究方向为生态环境管理与咨询、固体废弃物资源化。Email: weihangshen@foxmail.com

*通信作者: 叶脉, 博士, 高级工程师, 研究方向为固体废物处理处置与环境管理、环境风险与应急管理。

Email: vein1980@163.com

可行性和经济可行性。本研究拟解决的科学问题有两个：一是厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣共堆肥的技术可行性，探讨不同通风方式和外源菌剂对厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣中试堆肥化效果的影响。其二是厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣共堆肥的经济可行性，综合分析本研究共堆肥系统实际应用于区域人口为 30 000 人的片区的生活垃圾处理，核算其收入和支出，确认其经济可行性，以期为实现厨余垃圾、绿化废弃物和茶叶渣的低成本、规模化处理，有效解决厨余等有机废弃物环境污染问题提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

厨余垃圾取自珠海横琴居民生活垃圾源头分类示范点，绿化废弃物取自某小区绿化废弃物，含落叶、树枝、草屑、绿化修剪物等，茶叶渣由康师傅控股食品公司提供，为绿茶生产过程产生的废弃物。绿化废弃物、厨余垃圾、茶叶渣以 3：2：1（质量分数）均匀混合，经粉碎机粉碎至平均粒径 φ 约为 2 cm，调节物料的含水率、碳氮比及堆积密度分别为 62.8%、30.2 和 0.57 kg/m³，并按比例投菌剂。堆肥原料的理化性质见表 1。

表 1 堆肥原料的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of composting materials

原料 Raw materials	含水率 Water content/%	pH 值 pH value	堆积密度 Bulk density/(kg·m ⁻³)	粒径 Particle size/cm	木质素和粗纤维 Lignin and crude fibers/%	有机质含量（质量分数） Organic matter (mass fraction)/%	碳氮比 C/N
绿化废弃物 Green wastes	41.8±3.54	7.2±0.89	0.4±0.14	2±1.67	35.2±6.16	78.5±11.01	56.5±10.21
厨余垃圾 Kitchen wastes	82±13.08	8.3±1.41	0.8±0.15	1.2±0.79	2.5±1.37	13.7±2.31	15.72±4.00
茶叶渣 Exhausted tea	75±8.89	7.1±0.79	0.65±0.06	1.5±0.89	12.8±1.93	72±12.31	19.7±4.44
混合原料 Mixed ingredients	62.8±6.88	7.4±1.18	0.57±0.13	1.8±0.52	20.57±2.11	65.4±6.81	30.2±1.95

课题组前期研究表明复配微生物菌剂可强化厨余垃圾好氧堆肥效果^[14]，且其他相关研究也表明米曲霉^[15]、地衣芽孢杆菌^[16]、解脂假丝酵母^[17]、木霉菌^[18]和固氮菌^[19]能特异性地降解堆肥物料中的蛋白质、脂肪、纤维素等组分。基于前期研究结果和堆肥物料的理化特性，本研究将米曲霉、地衣芽孢杆菌、解脂假丝酵母、绿色木霉、褐球固氮菌，按质量比 1.5：1：1.2：2：1 复配。试验复配菌剂所用微生物菌种采购于中国微生物菌种保藏中心，活化复苏后保存在 4℃ 冰箱。解脂假丝酵母（*Candida lipolytica*，保藏编号：GIM2.187）；米曲霉（*Aspergillus oryzae*（Ahlburg）Cohn，保藏编号：GIM3.30）；地衣芽孢杆菌（*Bacillus licheniformis*（Weigmann）Chester emend. Gibson，保藏编号：CICC21737）；绿色木霉（*Trichoderma viride* Persoon 保藏编号：GIM3.432）；褐球固氮菌（*Azotobacter chroococcum* 保藏编号：CICC21686）。碧沃丰®堆肥菌剂（Bioform® Compost Activator）购于碧沃丰生物科技（广东）股份有限公司，接种量约为 1%。该菌剂是碧沃丰公司生产的一款常用堆肥菌剂产品，在广东、江苏等多地有较多应用案例，对废物有机组分有较好的降解效果。

1.2 好氧堆肥成套设备

本研究采用的好氧堆肥成套设备包括破碎设备、脱水设备、输送设备、湿热升温系统、供气系统、好氧发酵系统、腐熟出料装置、废气收集系统、除臭系统、电气系统、计量系统等。

主发酵系统包括主发酵筒、进料装置和动力装置，主发酵筒包括筒体，筒体安装在支撑架上，筒体包括进料口、出料口和物料腔，进料装置的进料端连通进料口；动力装置驱动筒体绕其轴线转动；主发酵筒还包括多个推板，多个推板位于物料腔内，推板用于推动物料腔内的物料沿筒体的轴向移动；主发酵筒还包括进气系统以及排气系统，排气系统的排气口与进料口位于筒体的同

一端，排气口连通物料腔。该好氧堆肥成套设备通过筒体自身的旋转，实现筒体内的物料水平推进、反复旋转搅拌，达到物料降解发酵的目的。

1.3 试验设置

试验主要考察菌种类型、供气方式对有机废弃物共堆肥效果的影响，分别以菌种和供气方式为自变量，共设置 7 个组别，含 6 个试验组（S1～S6）和 1 个空白对照组（S0）。堆肥处理周期为 10 d，发酵罐筒体 1 d 翻转 1 次；间歇供气参数为：供气 40 min，停止 20 min，供气量 3 m³/min；连续供气参数：供气量 2 m³/min。具体试验参数设计见表 2。

表 2 堆肥试验设置
Table 2 Experiments setup of aerobic composting

组别 Group		菌种 Strains	供气方式 Ventilation methods	堆肥周期 Composting period/d
对照组 Control group	S0	/	不供气	10
试验组 Test group	S1	/	连续供气	10
	S2	/	间歇式供气	10
	S3	碧沃丰®堆肥菌剂	连续供气	10
	S4	碧沃丰®堆肥菌剂	间歇式供气	10
	S5	复配菌剂	连续供气	10
	S6	复配菌剂	间歇式供气	10

注：间歇式供气：供气 40 min，停止 20 min，供气量 3 m³·min⁻¹；连续供气：供气量 2 m³·min⁻¹。
Note: Intermittent ventilation pattern: air supply 40 min, stop 20 min, air supply volume 3 m³·min⁻¹; continuous ventilation pattern: air supply volume 2 m³·min⁻¹.

1.4 试验方法

1.4.1 取样方法

试验周期控制在 10 d，分别在正常堆肥期间的开始阶段（0 d）和结束阶段（10 d）用四分法采集 500 g 样品分为 3 份：一份鲜样存储于 4℃ 冰箱中；一份鲜样经冷冻干燥机处理后存储于 4℃ 冰箱中；一份鲜样经 105℃ 烘干 24 h 后备用。

1.4.2 测定项目与方法

1) 堆肥原料理化性质的测定

将一定量鲜样与去离子水以 1:5 比例混合,浸提 1 h 后过滤测定 pH 值;用 5 L 量杯盛满物料,通过物料质量和体积推算容重。选取一定比例的物料用游标卡尺测定粒径取平均值。木质素和粗纤维采用《农业生物质原料纤维素、半纤维素、木质素测定》(NY/T 3494—2019)进行分析测试。称取 20 g 鲜样,置于已恒质量的瓷坩埚中,在马弗炉中 550 ℃恒温灼烧 6~8 h 后取出移入干燥器中冷却,样品灼烧前后的质量差即为有机质含量。

2) 堆体温度的测定

在发酵筒进出气口、筒体前中后部位共 8 处安装有温度探头,每隔 1 h 自动记录温度和时间数据并导入电脑。

3) 含水率和 C/N 测定

取一定量鲜样经 105 ℃烘干 24 h 至恒质量后测定含水率。将一定量鲜样经冷冻干燥机处理后研磨并过 100 目标标准筛(孔径 0.15 mm)后测定 C/N。

4) 有机肥产品肥效、粪大肠菌群数和蛔虫卵死亡率测定

有机肥产品肥效、粪大肠菌群数、蛔虫卵死亡率的测定分别参考《中华人民共和国农业行业标准 有机肥料》(NY/T 525—2021)、《肥料中粪大肠菌群的测定》(GB/T 19524.1—2004)、《肥料中蛔虫卵死亡率的测定》(GB/T 19524.2—2004)执行。

5) 种子发芽指数(GI)的测定

称取 5 g 堆肥产物鲜样,按质量体积比 1:10,用去离子水浸提,振荡 2 h,浸提液在 5 000 r/min 下离心分离 20 min,上清液经滤纸过滤后待用。将一张滤纸放在干净无菌的 9 cm 培养皿中,在滤纸上均匀摆放 20 粒樱桃萝卜种子,吸取 5 mL 的滤液于培养皿中,在 30 ℃暗箱中培养 48 h 后,计算种子发芽率并测定根长,然后计算种子发芽指数。每个样品 3 次重复,并同时用蒸馏水作空白对照^[20-21]。应用种子发芽率和根长来计算发芽指数(Germination Index, GI, %)来综合评估。

$$GI = \frac{\text{堆肥浸提液种子发芽率} \times \text{种子根长}}{\text{蒸馏水种子发芽率} \times \text{种子根长}} \times 100\%$$

1.5 数据处理分析

每个样品对应的指标重复测 3 次,温度取 8 处探头温度结果,分别计算平均值和标准差,结果以“平均值±标准差”表示。使用 Excel 和 SPSS 对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 堆体温度的变化

堆体温度的变化可指示堆肥是否达到高温阶段,是否已腐熟完全。研究认为,有效堆肥过程中堆体最高温度至少需在 55 ℃以上维持 5~7 d,蛔虫卵等才可基本实现有效消杀,堆肥卫生指标趋于良好^[20,22]。

由图 1 可知,不同处理堆体的温度都经历了三个明显的变化时期:上升期、高温期和下降期。虽然整体趋势基本保持一致,但不同处理堆体的升温速率、峰值温度、高温持续时间均存在明显差异。不同处理高温期温

度情况见表 3。

由表 3 可以看出,S0、S1 和 S2 堆肥物料温度缓慢升高,需 4~5 d 堆体温度才超过 50 ℃,但 S2 和 S1 的升温速率以及最高温度(S2: 8.88 ℃/d, 57.5 ℃; S1: 7.48 ℃/d, 52.4 ℃)均高于 S0 (7.22 ℃/d, 50.1 ℃),高温期均只持续了 2~3 d; S3 和 S4 堆肥物料经过 4 d 进入高温期,最高温度分别为 61.6 和 63.8 ℃,升温速率分别达到 11.40 和 12.20 ℃/d,高温持续时间分别为 3 和 4 d; S5 和 S6 堆肥物料仅经过 2 d 就进入了高温期,最高温度分别为 65.1 和 68.6 ℃,升温速率分别高达 24.55 和 25.80 ℃/d,65 ℃以上高温持续时间分别为 5 和 7 d; S0~S6 的堆肥物料在第 10 天时其温度在 36~54 ℃之间,都高于室温,说明物料还没有稳定,需要进行进一步陈化处理。

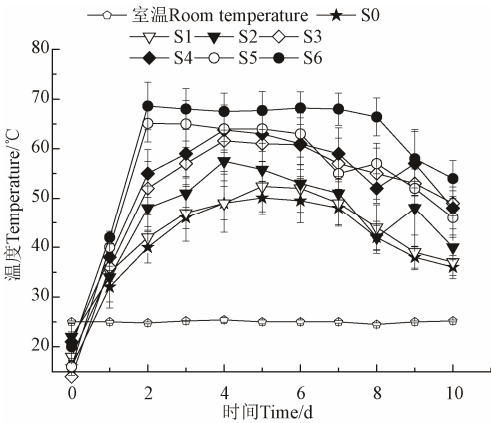


图 1 不同处理堆体温度的变化

Fig.1 Variation of composting pile temperatures under different treatments

表 3 不同处理高温期温度情况

Table 3 Temperature conditions of high temperature period under different treatments

项目 Items	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
初始温度 Initial temperature/℃	14	18	22	16	21	16	20
达到 50℃ 所需时间 Time required to reach 50℃/d	5	5	4	4	4	2	2
最高温度 Maximum temperature/℃	50.1	52.4	57.5	61.6	63.8	65.1	68.6
高温持续时间 High temperature duration/d	2	2	3	3	4	5	7
升温速率 Heating rate/(℃·d ⁻¹)	7.22	7.48	8.88	11.40	12.20	24.55	25.80

对比 S0、S1 和 S2 可知,在都不添加菌种的条件下,供气可促进物料升温,并且间歇式供气对物料的升温效果明显优于连续式供气。对比 S3、S4 或 S5、S6 可知,在使用相同菌种时,间歇式供气对物料的升温效果也明显优于连续式供气,这是由于不间断的通风会带走大量水分和大量热量,进而使堆体整体温度偏低,堆肥的高温期持续时间缩短、温度下降期提前到来^[23-24]。而间歇通风由于控制了通风时间,延长了空气与微生物、物料的接触时间,同时也降低了通风热量散失,使得高温期温度较高、持续时间也较长^[4,9],这说明了间歇式通风能

够有效延长堆肥过程在高温期的维持时间。

对比 S1、S3、S5 或 S2、S4、S6 可知，当供气方式相同时，复配菌剂对物料的升温效果均优于碧沃丰®堆肥菌剂。这是因为相对于碧沃丰®堆肥菌剂，本试验复配菌剂中的米曲霉、地衣芽孢杆菌、解脂假丝酵母、木霉菌和固氮菌能特异地降解堆肥物料中的蛋白质、脂肪、纤维素等组分，更适合本试验有机质物料的好氧发酵，这可能是由于米曲霉、地衣芽孢杆菌、解脂假丝酵母、木霉菌和固氮菌是共堆肥微生物系统中的优势菌种类型，其分泌产生的蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶、纤维素酶等可加速物料中的蛋白质、脂肪、纤维素等组分的有效降解。该结果与之前学者的研究一致：王建博^[15]在猪粪的活性堆肥技术研究中分别将秸秆、麦秆、木屑与猪粪进行堆肥试验，筛选确定米曲霉可作为优势菌种，获得的堆肥中含有丰富的营养元素和有机质；邹林源^[16]研究发现地衣芽孢杆菌 *B.licheniformis* CP-16 具有角蛋白降解相关蛋白酶，可强化角蛋白的降解过程；周勇^[25]研究发现地衣芽孢杆菌具有较强的淀粉降解能力，淀粉在 24 h 降解率达 81.8%；温赛^[17]研究发现亚罗解脂假丝酵母 *Candida* sp.99-125 可产生活性高、催化活性强的胞外脂肪酶，应用于油脂资源化利用；李振红等^[18]发现木霉菌对纤维素的降解效果较好，其在 4 d 内可将滤纸平板完全降解为黏质；蒲一涛等^[19]研究表明，自生固氮菌与纤维素分解菌可互利共生，接种后可提高生活垃圾的降解速度。同时也有研究表明，添加合适的发酵菌剂对堆肥腐熟及质量提升具有较大促进作用^[22]。合适的菌剂能更为有效地分解堆肥有机物质，增加堆肥产品的养分总量，同时减少对植物根系的盐害^[3,10,21]。

2.2 含水率和 C/N 变化

堆肥物料水分含量过高易导致传质条件差，而水分含量过低则会降低堆肥微生物活性；同时，碳素和氮素是微生物生长繁殖所需的关键元素。因此，物料含水率和 C/N 是衡量物料堆肥进程的关键指标。不同条件下物料含水率及 C/N 变化情况如图 2 和图 3 所示。

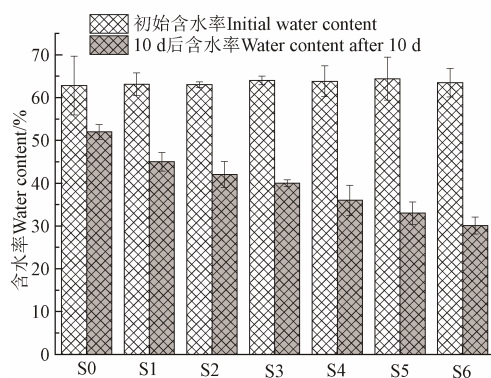


图 2 不同处理堆体的含水率

Fig.2 Water content of composting piles under different treatments

可以看出，间歇通风的物料水分去除效果优于持续通风。堆肥结束时，S5 和 S6 的物料的含水率分别由 64.4%

和 63.5%降低至 33%和 30.1%；而 S3 和 S4 的物料含水率仅由 64%和 63.8%降低至 40%和 36%；S1 和 S2 的物料含水率仅由 63.1%和 63%降低至 45%和 42%。一方面，持续通风堆肥过程中较低的堆体温度，使得堆料中水分在堆肥过程中蒸发散失的速率较低，堆肥过程中堆料含水率始终处于较高水平，可能会影响堆料的透气性，导致堆体内部氧气供应不足；间歇通风堆肥中，由于堆体温度高，维持时间长，虽然通风量相对较低，然而水分损失却较高；另一方面，复配的菌种可以更有效地加速发酵过程，产生更多热量，导致更高的水分损失^[22,26]。研究表明，对于初始 C/N 比在 25~30 的堆肥物料，当堆肥结束时其 C/N 比下降到 15~20 以下时，可认为堆肥物料已达到腐熟，当小于 10 时则可认为腐熟情况较好^[4,27]。可以看出 S6 的 C/N 降低幅度最大，由 31.5 降到 9.6，表明该试验组中堆肥原料的营养元素已被微生物大幅消纳用于自身新陈代谢；S5 效果次之，其 C/N 由 33 降至 10.5；S0、S1、S2、S3 和 S4 的 C/N 分别降至 24.8、21.3、18.4、17.5 和 13.8，说明 S4 已经腐熟，S0、S1、S2 和 S3 还没有完全腐熟。碳氮比的变化规律与温度、含水率变化规律一致，即利用复配菌剂，采取间歇式通风，可加速物料堆肥腐熟过程。

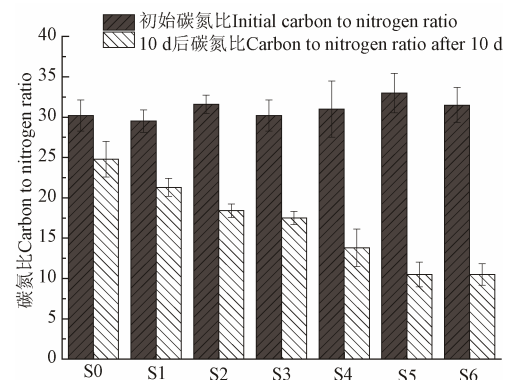


图 3 不同处理堆体的碳氮比

Fig.3 C/N of composting piles under different treatments

2.3 堆肥产物总养分及有机质含量变化

堆肥产品中总养分及有机质的含量决定了堆肥产物的土地利用价值。不同处理方法下堆肥产物营养元素含量变化情况如图 4 所示。

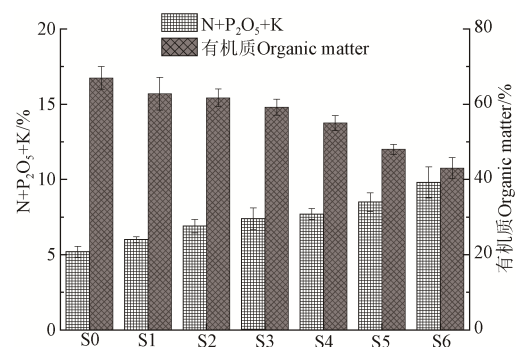


图 4 不同处理堆肥产物总养分及有机质含量

Fig.4 Total nutrient and organic content of compost products under different treatments

在物料堆肥过程中, 氮素以氨的形式散失是总养分损失的主要途径, 通风量与通风方式的变换会对堆体中氮素的挥发造成较大影响^[3,14]。由图 4 可知, 堆肥产品总养分服从 S6 (9.8%)>S5 (8.5%)>S4 (7.7%)>S3 (7.4%)>S2 (6.9%)>S1 (6.0%)>S0 (5.2%) 的规律。连续式通风组别的养分普遍低于间歇式通风的组别, 这是由于持续通风堆肥的通风量较大, 通风无间断, 大量氮在高温期随通风挥发散失; 而在间歇式通风堆肥过程中, 虽然高温段持续时间长, 氮的挥发与散失较多, 但是由于复配菌剂具有较强保氮功能, 使其整个堆肥过程的氮损失明显小于持续通风, 总养分相应高于连续通风^[28-30]。同时可以看出, 堆肥产品有机质含量变化规律为 S6 (43%)<S5 (48%)<S4 (55%)

<S3 (59.2%)<S2 (61.7%)<S1 (62.8%)<S0 (67%)。堆肥产物的总养分 (9.8%) 和有机质含量 (43%) 均远高于 NY/T 525—2021 农业行业标准 (总养分≥4%, 有机质含量≥30%)。由此可知, 良好的堆肥过程控制 (间歇式通风、接种适合物料的菌种) 可使物料中的更多的有机物朝稳定的有机质转化, 提升产品质量。

2.4 堆肥产物种子发芽指数以及卫生学特性

由于未腐熟完全的堆肥中可能含有多种小分子有机物会影响种子发芽及植物的根系生长, 故种子发芽指数 (GI) 是表征堆肥腐熟度的有效指标。一般认为, 当 GI>50% 时, 堆肥已无植物毒性, GI>80% 时说明堆肥已达到腐熟^[4,29]。不同堆肥产物的种子发芽指数 (GI) 及卫生学特性如表 4 所示。

表 4 不同条件下堆肥产物种子发芽率及卫生学特性
Table 4 Germination index and hygienic characteristics of compost products under different conditions

项目 Items	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
发芽指数 Germination index/%	45±6.24	58±7.21	66±6.24	70±1.73	75±5.29	82.1±2.79	88.3±2.00
粪大肠菌群数 Fecal coliforms/(个·g ⁻¹)	201±17	109±9	88±11	69±8	18±4	6±1	2±1
蛔虫卵死亡率 Mortality of roundworm eggs/%	69±5.20	72±7.00	88±6.56	96±2.65	99±1.00	100	100

由表 4 可以看出, 除 S0 之外, 其余 6 个试验组的堆肥产物 GI 均大于 50%, 说明 S1~S6 堆肥均无植物毒性。S0 堆肥产物发芽指数仅为 45%, 说明其尚未完全腐熟; 采用复配菌剂, 并进行间歇式通风的堆肥, 发芽指数最高为 88.3%, 说明其已达到腐熟。持续通风的方式未能将高温期维持足够长的时间, 有机物降解不充分、堆肥产物稳定化效果欠佳; 间歇式通风和复配菌剂协同, 通过加强堆肥过程中对有机物的降解与稳定化, 削弱了堆肥产物的植物毒性, 种子发芽指数整体较高^[20,26]。

高温能够有效杀灭堆肥原料中有的致病菌、寄生虫卵等影响堆肥安全性的微生物, 一般常用粪大肠菌群值与蛔虫卵死亡率表征堆肥产物的卫生学特性^[31-32]。由表 4 可知, 由于原料卫生学特性较好, 致病菌与寄生虫卵含量低, 经过不同堆肥处理后, 堆料均能完成对致病菌等微生物的杀灭。7 个试验组中, 仅 S3、S4、S5 和 S6 四个处理的堆肥产物中粪大肠菌群数和蛔虫卵死亡率满足《中华人民共和国农业行业标准》(NY/T 525—2021) 中的限值要求 (粪大肠菌群数≤100 个/g, 蛔虫卵死亡率≥95%)。说明 S3、S4、S5 和 S6 对应的四种堆肥产物的卫生学特性质量整体良好, 其中以 S6 (间歇式通风、接种复配菌剂) 堆肥产物的卫生学特性质量最优, 类大肠菌群数<3 个/g, 产物中未见蛔虫卵。

3 共堆肥系统的经济核算

为进一步说明共堆肥系统经济可行性, 本研究综合分析了该共堆肥系统实际应用于广东珠海横琴区域人口为 30 000 人的片区的生活垃圾处理, 核算其收入和支出, 确认其经济可行性。城市人均生活垃圾产生量按 1 kg/(人·d) 计^[33-34], 该片区其垃圾产量约为 30 t/d, 其中厨余垃圾约 12 t/d, 可回收废品约 6 t/d, 收集的绿化废弃物和茶叶渣约 24 t/d (绿化废弃物: 厨余垃圾: 茶叶渣=3:2:1), 堆肥处理有机废物 36 t/d, 处理剩余废物进入垃圾填埋场的填埋量 12 t/d。堆肥物料与有机肥之间的转化比例以

20% 计^[35], 一年以 300 个工作日计。收入主要包括: 垃圾处置费约 255 元/t, 绿化废弃物、茶叶渣处置费约 120 元/t, 有机肥销售费约 1 000 元/t, 废品回收约 500 元/t。支出主要包括: 水、电费约 108 元/t, 人员工资约 7.2 万元/(人·a), 堆肥原料平均运输费约 60 元/t, 废物填埋费用约 200 元/t, 场地租赁费约 15 万元/a, 设备折旧成本约 10 万元/a, 其他不可预计费用约 20 万元/a。由于研发该共堆肥系统的主要目的是废物处置和资源化利用, 实际工程应用中需选取处置利用效果更好的方式, 故本项目选择间歇式通风方式 (采用间歇式供气, 即供气 40 min, 停止 20 min, 供气量 3 m³/min) 来进行成本核算费用。共堆肥系统废物处置费用核算明细如表 5 所示。

需注意, 表 5 共堆肥系统废物处置费用核算过程所涉及的经济参数均有一定的不确定性, 如在收入方面, 垃圾、绿化废弃物、茶叶渣处置费, 堆肥产品销售以及废品回收随市场行情存在一定幅度的波动; 在支出方面, 人员工资、运输费、废物填埋费、场地租赁费以及系统放大后存在的诸如臭气处理成本等也都存在一定的不确定性。由中国建设工程造价管理协会 2012 年 4 月发布的《建设工程造价咨询成果文件质量标准》(CECA/GC 7—2012) 可知, 在相同口径下可行性研究阶段建设项目投资估算的综合误差率应小于 10%^[36]。参考上述条款并基于项目地广东珠海横琴的实际情况, 本研究共堆肥系统废物处置费用的综合误差率按 8% 计。

由表 5 可知, 在共堆肥系统下废物的平均处置成本为 (248.67±19.89) 元/t, 并且该模式下运营单位一年约有 219.06 万元的盈利。政府投入 255 元/t 的垃圾处置费就可以实现生活垃圾等废物的减量化、无害化和资源化, 有利于缓解政府面临的垃圾围城困境。据统计, 上海市垃圾分类与处理全过程总成本为 985 元/t。包括前端垃圾分类服务成本为 390 元/t, 这部分服务包括垃圾分类督导和装备垃圾分类智能设备; 中端垃圾收运成本为 290 元/t, 这部分服务包括垃圾

清运、中转和转运；终端垃圾处理包括垃圾焚烧和湿垃圾处置，综合成本为 305 元/t^[37]。北京市生活垃圾管理“收集-运输-转运-焚烧-填埋”全过程社会成本 2 253 元/t^[38]。该两种模式的垃圾处置费用均远高于本章节共堆肥-成套设备系统

处理模式下的费用。对比之下，该模式明显降低了废物的平均处置成本；此外，若将片区的环卫服务、垃圾分类、共堆肥以及再生资源回收一体化运营，提高资源回收利用和垃圾分类效率，则该模式下的废物处置成本还可进一步降低。

表 5 共堆肥系统废物处置费用核算
Table 5 Disposal costs accounting of co-composting system

序号 No.	收入 Revenue		备注 Note	支出 Expenses		备注 Note
	项目 Item	数额 Amount (10 ⁴ 元·a ⁻¹)		项目 Item	数额 Amount (10 ⁴ 元·a ⁻¹)	
1	垃圾处置费	229.50	垃圾产量约为 30 t·d ⁻¹ ，垃圾处置费约 255 元·t ⁻¹ ，一年以 300 个工作日计	水电费	116.64	水、电费约 108 元·t ⁻¹ ，处置费废物量为 36 t·d ⁻¹ （含厨余垃圾约 12 t·d ⁻¹ ，绿化废弃物和茶叶渣约 24 t·d ⁻¹ ）
2	绿化废弃物、茶叶渣处置费	86.40	绿化废弃物、茶叶渣的处置量 24 t·d ⁻¹ ，处置费约 120 元·t ⁻¹	人员工资	72.00	人员工资约 7.2 万元·(人·年) ⁻¹ ，人数按 10 计
3	堆肥产品销售	216.00	堆肥物料与有机肥之间的转化比例以 20%计，有机肥销售费约 1 000 元·t ⁻¹	运输费	97.20	堆肥原料平均运输费约 60 元·t ⁻¹ ，运输量为 54 t·d ⁻¹ （垃圾运输量 30 t·d ⁻¹ ，绿化废弃物、茶叶渣的处置量 24 t·d ⁻¹ ）
4	废品回收	90.00	废品回收约 500 元·t ⁻¹ ，可回收废品约 6 t·d ⁻¹	废物填埋费	72.00	垃圾产量约为 30 t·d ⁻¹ ，除去其中的厨余垃圾约 12 t·d ⁻¹ ，可回收废品约 6 t·d ⁻¹ ，剩余废物 12 t·d ⁻¹ ，填埋费用约 200 元·t ⁻¹
5	/	/	/	场地租赁费	15.00	/
6	/	/	/	设备折旧	10.00	设备原值 100 万，按 10 a 折旧
7	/	/	/	其他不可预计费用（含菌种复配或购置等）	20.00	/
合计 Total		621.90	/		402.84	/
					废物平均处置成本：248.67±19.89 元·t ⁻¹	

注：废物平均处置成本核算时，共堆肥系统废物处置费用的综合误差率参考《建设工程造价咨询成果文件质量标准》（CECA/GC 7—2012）按 8%计。
Note: Accounting for average waste disposal costs, comprehensive error rate of the co-composting systems is assumed to be 8% referencing quality standards for construction cost consulting documents (CECA/GC 7-2012).

4 结 论

1) 绿化废弃物、厨余垃圾、茶叶渣以 3 : 2 : 1 配比，并按 1‰投加复配菌剂（解脂假丝酵母、米曲霉、地衣芽孢杆菌、绿色木霉及菌褐球固氮菌，1.5 : 1 : 1.2 : 2 : 1），在间歇式通风工艺条件下（供气 40 min，停止 20 min，供气量 3 m³/min），堆肥在 65 ℃以上高温持续 7 d；经 10 d 发酵，物料含水率和 C/N 由 63.5%和 31.5 分别降至 30.1%和 9.6；堆肥产物总养分和有机质含量远高于农业行业标准；同时堆肥产物种子发芽指数高达 88.3%，卫生学特性状况良好，该中试共堆肥系统具有技术可行性。

2) 该共堆肥系统应用于区域人口为 30 000 人的片区的生活垃圾处理，废物平均处置成本低至（248.67±19.89）元/t，该中试共堆肥系统具有经济可行性。

参 考 文 献

[1] 靳晨曦, 孙士强, 盛维杰, 等. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1240-1251.
Jin Chenxi, Sun Shiqiang, Sheng Weijie, et al. Food waste treatment technology and resource solution options in China[J]. China Environmental Science, 2022, 42(3): 1240-1251. (in Chinese with English abstract)

[2] 张红玉, 路朋, 李国学, 等. 秸秆添加对厨余垃圾堆肥臭气和渗滤液减排的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 248-254.
Zhang Hongyu, Lu Peng, Li Guoxue, et al. Effect of corn stalks addition on odors and leachate reduction during

kitchen waste composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 248-254. (in Chinese with English abstract)

[3] 白婧. 餐厨垃圾与绿化废弃物换向通风堆肥及其草坪施用研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
Bai Jing. Study on Composting with Reversing Air of Kitchen Waste and Greening Waste and Its Application on Lawn[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)

[4] 沈玉君, 张卜元, 丁京涛, 等. 奶牛粪便与秸秆混合发酵过程通风工艺优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 242-250.
Shen Yujun, Zhang Buyuan, Ding Jingtao, et al. Optimization of the ventilation technology for the mixed fermentation of cow manure and crop straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(4): 242-250. (in Chinese with English abstract)

[5] 邹德勋, 汪群慧, 隋克俭, 等. 餐厨垃圾与菌糠混合好氧堆肥效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 269-273.
Zou Dexun, Wang Qunhui, Sui Kejian, et al. Aerobic composting effect of kitchen garbage and spent mushroom substrate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 269-273. (in Chinese with English abstract)

[6] 张红玉. 厨余垃圾、猪粪和秸秆联合堆肥的腐熟度评价[J]. 环境工程, 2013, 31(S1): 470-474.
Zhang Hongyu. Maturity evaluation of kitchen waste, pig manure and corn-straw co-composting[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 470-474. (in Chinese with English abstract)

[7] Tosun I, Gonullu M T, Arslankaya E, et al. Co-composting

- kinetics of rose processing waste with OFMSW[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 6143-6149.
- [8] Olufunke C, Doulaye K, Silke R, et al. Co-composting of faecal sludge and organic solid waste for agriculture[J]. Process Dynamics Water Research, 2009, 43: 4665-4675.
 - [9] Lhadi E K, Tazi H, Aylaj M, et al. Organic matter evolution during co-composting of the organic fraction of municipal waste and poultry manure[J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 2117-2123.
 - [10] 黄光群, 余浩, 方晨, 等. 奶牛粪固形物热风干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 186-193. Huang Guangqun, Yu Hao, Fang Chen, et al. Hot-air drying characteristics and optimization of the process parameters for the solid fraction of dairy manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(23): 186-193. (in Chinese with English abstract)
 - [11] 沈玉君, 张朋月, 孟海波, 等. 通风方式对猪粪堆肥主要臭气物质控制的影响研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 203-209. Shen Yujun, Zhang Pengyue, Meng Haibo, et al. Effects of ventilation modes on control of main odor substances in pig manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 203-209. (in Chinese with English abstract)
 - [12] 王友玲, 邱慧珍, Philip Ghanney, 等. 通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 313-320. Wang Youling, Qiu Huizhen, Philip Ghanney, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 313-320. (in Chinese with English abstract)
 - [13] 李旭东. 厨余垃圾好氧堆肥中菌剂复配和蓬松剂的组合效果及其应用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020. Li Xudong. Combination Effect and Application of Combined Bacteria and Fluffing Agent in Aerobic Composting of Kitchen Waste[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
 - [14] 周营, 朱能武, 刘博文, 等. 微生物菌剂复配及强化厨余垃圾好氧堆肥效果分析[J]. 环境工程学报, 2018, 12(1): 294-303. Zhou Ying, Zhu Nengwu, Liu Bowen, et al. Effect analysis of compound microbial agents and enhancement on kitchen waste aerobic composting[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(1): 294-303. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 王健博. 猪粪的活性堆肥技术研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013. Wang Jianbo. Pig Manure Composting Technology Research[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 邹林源. 地衣芽孢杆菌 CP-16 与嗜麦芽窄食单胞菌 10 号菌降解角蛋白关键酶研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. Zou Linyuan. The Key Hydrolysis Enzymes of Keratin in *B.licheniformis* CP-16 and *S.maltophilia* 10[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 温赛. 亚罗解脂假丝酵母脂肪酶的高水平重组表达、分子体外进化研究及其在手性拆分中的应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2012. Wen Sai. High-level Heterologous Expression and in Vitro Molecular Evolution of Lipase Lip2 from *Yarrowia lipolytic*, and Its Application in Kinetic Resolution[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 李振红, 陆贻通. 高效纤维素降解菌的筛选[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(3): 131-134. Li Zhenhong, Lu Yitong. Screening on the cellulose-decomposing microorganisms[J]. Environmental Pollution & Control, 2003, 25(3): 131-134. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 蒲一涛, 钟毅沪, 周万龙. 固氮菌和纤维素分解菌的混合培养及其对生活垃圾降解的影响[J]. 环境科学与技术, 1999(1): 15-18. Pu Yitao, Zhong Yihu, Zhou Wanlong. The Mixed culturing of nitrogen-fixation bacteria and cellulose decomposing organism and the effects on the decomposing of the household garbage[J]. Environmental Science & Technology, 1999(1): 15-18. (in Chinese with English abstract)
 - [20] Chen K B, He S Y, Feng H J. Study on the characteristic of rural domestic garbage in Zhejiang[J]. Energy Engineering, 2010, 1: 39-43.
 - [21] 徐成, 刘国涛, 王政, 等. 添加腐熟堆肥对厨余垃圾堆肥腐殖质形成的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(8): 122-127. Xu Cheng, Liu Guotao, Wang Zheng, et al. Effect of matured compost addition on the formation of humus in kitchen waste composting[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(8): 122-127. (in Chinese with English abstract)
 - [22] 魏自民, 席北斗, 赵越. 生活垃圾微生物强化堆肥技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
 - [23] 张喻. 污泥与绿化废物共堆肥研究及其与生物干化工艺的对比[D]. 北京: 清华大学, 2013. Zhang Yu. Research on Co-composting of Sewage Sludge and Green Wastes Comparing with Sludge Biodrying[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese with English abstract)
 - [24] 方华舟, 安冬梅, 王培清, 等. 牛粪自然好氧发酵微生物变化规律[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1): 333-339. Fang Huazhou, An Dongmei, Wang Peiqing, et al. Natural aerobic fermentation microorganism change regularity in cow dung[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(1): 333-339. (in Chinese with English abstract)
 - [25] 周勇. 蛋白质、淀粉降解菌株的分离筛选及其在禽畜粪便资源化处理中的应用效果[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019. Zhou Yong. Screening of Bacterial Strains for Protein and Starch Biodegradation and Their Application Effects in Resources Recovery of the Animal Manure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
 - [26] 赵由才, 宋玉. 生活垃圾处理与资源化技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
 - [27] 迟孟浩, 杨帆, 李旺旺, 等. 厨余垃圾堆肥间歇通风方式的可行性研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(8): 917-921, 942. Chi Menghao, Yang Fan, Li Wangwang, et al. Feasibility of intermittent aeration method on kitchen waste composting[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(8): 917-921, 942. (in Chinese with English abstract)
 - [28] 田赞. 园林废弃物堆肥化处理及其产品的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. Tian Yun. Green Waste Composting and the Products as the Peat Substitutes in Growth Media[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese with English abstract)
 - [29] Sundberg C, Jönsson H. Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration[J]. Waste Management, 2008, 28(3): 518-526.
 - [30] 周海宾, 刘娟, 丁京涛, 等. 采用 EEM-FRI 方法研究黑曲霉对牛粪堆肥腐熟及纤维素降解影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 276-286. Zhou Haibin, Liu Juan, Ding Jingtao, et al. Effects of *Aspergillus niger* on maturity and cellulose degradation of cow manure composting using EEM-FRI method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 276-286. (in Chinese with English abstract)
 - [31] Ge M S, Zhou H B, Shen Y J, et al. Effect of aeration rates on

- enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 304: 122928.
- [32] 徐鹏翔, 王越, 杨军香, 等. 好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2403-2408. Xu Pengxiang, Wang Yue, Yang Junxiang, et al. Advances in ventilation systems and parameter choices during aerobic composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2403-2408. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李赞, 袁京, 李国学, 等. 辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 1031-1039. Li Yun, Yuan Jing, Li Guoxue, et al. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1031-1039. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张玉冬, 张红玉, 顾军, 等. 通风方式对厨余垃圾堆肥腐熟度的影响[J]. *环境工程*, 2015, 33(S1): 619-622. Zhang Yudong, Zhang Hongyu, Gu Jun, et al. Effects of aeration modes on the maturity during kitchen waste composting[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(S1): 619-622. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杨延梅, 席北斗, 刘鸿亮, 等. 餐厨垃圾堆肥理化特性变化规律研究[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(2): 72-77. Yang Yanmei, Xi Beidou, Liu Hongliang, et al. Study on the change of physicochemical characteristics of food wastes during aerobic composting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(2): 72-77. (in Chinese with English abstract)
- [36] CECA/GC 7—2012, 建设工程造价咨询成果文件质量标准[S].
- [37] 搜狐网. 985 元/吨! 以上海为例“垃圾分类‘收运处’成本数据分析” [N/OL]. (2019-11-21)[2021-11-01]. https://www.sohu.com/a/355083118_160920.
- [38] 宋国君, 孙月阳, 赵畅, 等. 城市生活垃圾焚烧社会成本评估方法与应用: 以北京市为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(8): 17-27. Song Guojun, Sun Yueyang, Zhao Chang, et al. Social cost accounting for municipal solid waste incineration in Beijing[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(8): 17-27. (in Chinese with English abstract)

Evaluating co-composting of kitchens, greening wastes, and exhausted tea on a pilot scale

Shen Weihang¹, Song Yixin², Cao Jun¹, Ye Mai^{1*}, Zhu Nengwu³

(1. *Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China*; 2. *College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150038, China*; 3. *School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

Abstract: Effective disposal of organic wastes has been one of the most important issues for the resource utilization of solid wastes. The degradation rate of organic components as a key factor can pose a serious impact on the composting process. In this study, a series of experiments were performed on the microbial agents and various ventilation systems, in order to evaluate the co-composting performance of kitchens, green wastes, and exhausted tea on a pilot scale. An optimal compound ratio was also achieved to verify the strengthening effect of co-composting. The specific organic components included the fat crude, fibers, and protein in the mixed ingredients during composting. Specifically, kitchen waste, green waste, and exhausted tea were selected as the main raw materials. An aerobic composting was then carried out to control the ventilation and the type of microbial agents in a pilot composting plant. Some parameters were selected to fully evaluate the technical feasibility and economic viability of the co-composting system, including the temperature, water content, the carbon to nitrogen ratio, total nutrients, organic matter content, seed germination index, and hygienic characteristics. The results showed that the optimal combination was the self-developed microbial agents under the intermittent ventilation pattern, where the ratio of compound agents for the co-composting was that $m(Aspergillus oryzae): m(Bacillus licheniformis): m(Candida lipolytica): m(Trichoderma viride): m(Azotobacter chroococcum) = 1.5:1:1.2:2:1$. Meanwhile, the microbial agents presented a stronger removal effect of the specific organic component in the mixed ingredients, when the inoculation amount was 1%. Three classic phases were obtained in the temperature of the mixed ingredients during 10 days of drum composting, including heating, thermophilic, and cooling phases. Furthermore, the maximum temperature was up to 68.6°C, while the high-temperature period (65°C or higher) remained for 7 days. The ratio of water content and carbon to nitrogen declined from 63.5% to 30.1%, and 31.5 to 9.6, respectively, during the entire composting. The total nutrient (9.8%) and organic content (43%) were superior to the Agricultural Industry Standard NY 525-2021. Meanwhile, the seed germination index of the composting product reached up to 88.3%, indicating the perfect hygienic characteristics of composting (3 or fewer fecal coliforms per grams, no ova of roundworm was found). For economic feasibility, the co-composting system was applied for the domestic waste treatment in a district with a population of 30 000 in the Hengqin area of Zhuhai, Guangdong Province, China. A systematic analysis was made to consider the revenues (including waste disposal, organic fertilizer products, and scrap recycling revenue) and expenses (including utilities, salary, transportation, landfill disposal, venue rental, machinery and equipment depreciation, and unforeseeable expenses) during practical application. The average disposal cost was required as low as (248.67±19.89) yuan/t. As such, a process control strategy can be recommended to recycle the kitchen wastes, green wastes, and exhausted tea in the ecosystem, instead of being discarded as solid wastes. The short processing time can be widely expected to accelerate the degradation rate of organic matters for better compost quality during resource utilization. Meanwhile, an improved process control system can be used for the organic waste composting in a rotary drum reactor. The finding can provide a strong reference to effectively treat the environmental pollution of organic wastes in the large-scale kitchen waste, green waste, and exhausted tea at low cost. The recycling of organic waste resources can greatly contribute to reducing landfill disposal for less environmental pollution.

Keywords: composting; ventilation; waste disposal; kitchen waste; exhausted tea