



王嘉敏,李陈浩,胡艺馨,等. 基于温室酿热补气的棚体式发酵装置应用研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(2):242-252.

WANG Jiamin,LI Chenhao,HU Yixin,et al. Research on the application of greenhouse type fermentation equipment based on greenhouse heating and air replenishment[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(2):242-252.

基于温室酿热补气的棚体式发酵装置应用研究

王嘉敏,李陈浩,胡艺馨,李建明*

(西北农林科技大学园艺学院/农业农村部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:[目的]为解决目前我国农业废弃物数量庞大、资源化利用率低,以及冬季寒冷地区设施蔬菜生产温度低、CO₂不足等问题,本文设计出一种棚体式生物质发酵装置。[方法]该装置包括发酵棚体(长6 m、宽5 m、脊高2.8 m)、强制换热装置、室内加热管道3部分。以玉米秸秆和羊粪为原料进行分层堆放发酵,探究发酵装置的酿热性能,对设施温室热环境、气体环境和生产的影响,以及经济效益。[结果]该发酵装置内堆体的温度50℃以上共计65 d,产热效率达到74.94%;与对照温室相比,温度高1.04℃以上;堆肥发酵过程中,使用气体过滤装置及CO₂回收系统,其全球增温潜势(GWP)指数下降96.98%;与对照温室相比,CO₂浓度增加2 270.58 mg·m⁻³;加热区番茄的可溶性蛋白和维生素C含量分别比对照区增加24.6%和29.2%,番茄红素含量比对照区增加71.3%。生物发酵装置运行可提高单株产量5.99%。增加收入8 712元。[结论]寒冷地区应用棚体式生物质酿热装置可为日光温室提供热量和作物生长所需的CO₂,而且生产应用价值较高。

关键词:生物质发酵;CO₂;产热;强制换热

中图分类号:S216

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)02-0242-11

Research on the application of greenhouse type fermentation equipment based on greenhouse heating and air replenishment

WANG Jiamin,LI Chenhao,HU Yixin,LI Jianming*

(College of Horticulture/Key Laboratory of Horticultural Engineering in Northwest Facilities,Ministry of Agriculture and Rural Affairs,Northwest A&F University,Yangling 712100,China)

Abstract:[Objectives]To solve the current problems of large amount of agricultural waste,low resource utilization rate,and low temperature and insufficient CO₂ for production of facility vegetables in cold winter areas in China,a shed type biomass fermentation device was designed. [Methods]This equipment included fermentation shed body(6 m long,5 m wide,2.8 m ridge height),forced heat exchange device and indoor heating pipeline in three parts. Using corn straw and sheep manure as raw materials for layered pile fermentation,the thermal performance of the fermentation unit brew,the impact on the thermal environment,gas environment and production of the facility greenhouse,and the economic benefits were explored. [Results]The temperature of the pile in the fermentation unit was above 50℃ for a total of 65 d,and the heat production efficiency reached 74.94%. The temperatures were more than 1.04℃ higher compared with the control greenhouse. The global warming potential(GWP) index decreased 96.98% through the gas filtration device and CO₂ recovery system during the composting process. The CO₂ concentration increased 2 270.58 mg·m⁻³. The soluble protein and vitamin C contents of tomatoes in the heated area were 24.6% and 29.2% higher than those in the control area respectively,and the lycopene was 71.3% higher than that in the control area. The operation of the biofermentation unit increased the field per plant by 5.99% and increased income by 8 712 yuan. [Conclusions]The application of shed-body biomass brew heaters in cold regions could provide heat and CO₂ required for crop growth in facility greenhouses.

Keywords:biomass fermentation;CO₂;heat generation;forced heat exchange

近年来,伴随城镇化、工业化的发展及人口数量的快速增加,废弃物产生量也呈现逐年攀升趋势^[1]。据报道,到21世纪末全世界每天将会产生约1 100万t固体废物^[2]。据统计,2019年世界农业废弃物产生量约203亿t,其中畜禽粪污约160亿t、秸秆约43亿t,禽畜粪便中含有大量未被消化的氮磷化合物、重金属和药物残留,直接排放容易导致土壤板结、水体富营养化^[3]。随着农业秸秆数量激增,传统焚烧方式

收稿日期:2023-02-07

基金项目:国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-C05);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2020-YL-08)

*通信作者:李建明,教授,博导,主要从事设施园艺研究,E-mail:lijianming66@163.com。

造成的大气污染、火灾等问题也愈加严重^[4]。在越南,每年焚烧水稻秸秆产生的 PM₁₀排放量达到 517.8 t、PM_{2.5}达到 472.3 t^[5]。

中国作为人口大国,同时又处于传统农业转型期,农业生产水平提高的同时,每年也产生约 40 亿 t 禽畜粪便及 8.86 亿 t 农业秸秆,对环境影响巨大^[6-7]。据 Reddy 等^[8]2018 年统计,中国每年通过焚烧秸秆向大气中释放约 140 万 t PM_{2.5}和 1.44 亿 t 的 CO₂。因此,在“双碳”政策和 2022 年中央一号文件的精神指导下,如何综合利用农业秸秆等废弃物、降低禽畜粪便造成的环境污染成为目前亟待解决的问题。

面对全球增长的粮食危机与气候变化的现状,温室生产是提升农业生产力的有效方式^[4]。作为环境可控农业,其对能源依赖很大,尤其在我国寒冷地区,设施温室在不加温的情况下很难满足植物正常生长需要。以陕北地区为例,该地区年平均气温 8~12 ℃,年平均光照 2 500 h,受季风气候影响,冬季最低气温可达-20 ℃以下,传统燃煤、鼓风式温室加热方式因成本高、环境危害大已逐渐不适于规模化设施农业生产^[9]。因此,如何高效利用清洁能源,减少能耗成本,是我国温室生产可持续发展的核心问题^[10]。生物质发酵酿热技术作为可再生能源具有巨大潜力,可高效利用农业废弃物好氧发酵产生的热量与 CO₂ 为温室供暖补气,是目前的研究热点^[11]。孔政^[12]在 17 m 跨度、30 m 长的单层非对称保温温室中添加了 8 m³ 的农业废弃物进行发酵,发现番茄秸秆和猪粪混合堆肥产生的热量可使冬季日光温室的日平均气温提高 4.2 ℃,日最低气温平均提高 4.6 ℃。王斌等^[13]研究发现,采用有机废弃物生物发酵法产生的 CO₂ 气体浓度能在较长的一段时间内稳定在较高的水平,从而促进日光温室草莓植株生长和发育,提高草莓的产量和品质。而采用温室内酿热槽进行好氧发酵,存在有害气体扩散快、CO₂ 分布不均匀等问题。因此,本研究针对我国寒冷地区温室内低温、CO₂ 亏缺导致的生产受阻与农业废弃物利用率低等问题,提出了一种生物质发酵装置,监测其在延安地区冬季的综合发酵特性以及对日光温室的增温补气效果,以期实现温室生产的节能减排和农业废弃物资源高效利用。

1 材料与方法

1.1 发酵装置介绍

发酵装置分为发酵棚体、强制换热装置、室内加热管道 3 部分。如图 1、图 2 所示。

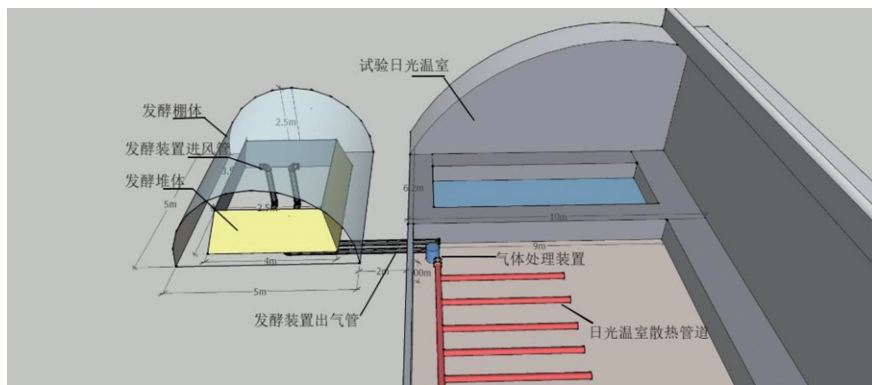


图 1 发酵棚体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fermentation plant

图 1 为发酵棚体。该棚体位于试验日光温室前屋面西侧山墙 2 m 处,为发酵装置的主体,整体长 6 m,跨度 5 m,脊高 2.8 m,实际占地面积为 30 m²。该棚体基于日光温室保温防寒的优势,日间利用太阳辐射为堆体加温、夜间借助保温被覆盖以维持堆体热量,从而达到快速启动堆肥、缩短堆肥中温期、延长高温时间的目的。

图 2-B、C 为强制换热装置。该换热装置包括管道风机、通风管道、气体处理装置 3 部分,其中管道风机功率为 140 W;通气管道为 PVC 材质,直径 200 mm,管道埋深 1 m。该装置中通气管道分为进气管和出气管 2 部分,在堆肥高温期(50 ℃以上),利用管道风机进行强制对流循环,在每日 17:00 至次日 09:00 将发酵产生的热量及 CO₂ 输送至试验温室内,以达到弥补温室夜间温度不足、延长堆肥高温期的目的。气体处理装置为容量 100 L 的塑料水桶,内置气体处理稀硫酸溶液。

室内加热管分为主管道和支管道 2 部分(图 2-D)。主管道与前屋面板种植株紧邻,采用直径 160 mm 的

PVC 管道,支管道布置在植物植株行间,采用直径为 130 mm 的牛津布送风带。其主要功能是将堆肥产生的热量和 CO₂ 输送至植物行间。



图2 发酵棚体(A)、强制换热装置(B、C)和室内加热管(D)

Fig. 2 Fermentation shed body(A), forced heat exchange device(B, C) and indoor heating pipe(D)

1.2 试验温室及对照温室介绍

试验温室及对照温室均为下沉式日光温室。温室坐北朝南、东西走向,长 110 m,跨度 12 m,脊高 6 m,下沉 1 m。在试验期间,试验温室和对照温室夜间均覆盖保温被,开闭保温被时间为每日 09:00—14:00。对照温室不设生物发酵装置。

试验温室及对照温室内均种植番茄品种‘丽莎’。目前,设施园艺作物栽培过程中常采用无土栽培形式如槽式、钵式、袋式,其可限制作物根系生长起到提高营养吸收效率、减少根系营养消耗的目的。不同方式的无土栽培形式,根系体积存在差异,因此为提高生物发酵装置在日光温室作物种植中的应用性,采用不同容量基质袋和盆栽混合栽植,分别设置 1、3、5、7 L 4 个处理,每个处理设置 3 个重复,在产量及品质测定上进行综合测定,得出客观且可为生产应用的数据。番茄栽植方式均采用大小行栽植,大行距为 80 cm,小行距为 60 cm,株距为 40 cm。种植时间为 2021 年 8 月 25 日,利用水肥一体化装置进行浇水施肥,主要由施肥桶、施肥泵控制开关等组成。

1.3 试验设计

试验于 2021 年 12 月至 2022 年 3 月在西北农林科技大学延安蔬菜试验示范站(北纬 36°87',东经 109°32',海拔 1 009.23 m)开展。以玉米秸秆和羊粪为原料,进行分层堆放发酵,原料基本理化性质见表 1。按照秸秆与羊粪 1.11:1 的质量比,将碳氮比调节为 30:1(质量比),含水率调为 60%。堆体长 5 m、宽 4 m、高 1.7 m。分析日光温室生物质发酵的酿热性能、物料理化性质对日光温室热环境、气体环境、番茄果实品质 and 经济效益的影响。

表 1 原料基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of raw materials

试验材料 Test materials	总有机碳含量/(g·kg ⁻¹) Total organic carbon content	全氮含量/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen content	含水率/% Moisture content	碳氮比 C/N ratio
羊粪 Sheep manure	339.00	18.46	41.49	18.36
玉米秸秆 Corn straw	394.50	6.71	45.90	58.79
淀粉 Starch	444.00			

发酵装置运行模式:堆体温度小于 50 ℃时,不进行强制通风,每日 10:00—16:00 开启保温被,利用太阳辐射为堆体发酵提供温度支持。堆体温度高于 50 ℃,采用管道通风模式,进行间歇式强对流循环(运行 15 min,间歇 45 min),运行时间为每日 17:00 至次日 09:00。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 环境气象数据测定 使用 Hobo MX1104 小型气象站用于测定试验温室内、室外和对照温室内以及

发酵棚体内部温度、湿度和光照的变化。堆体温度和温室内环境温度测定采用 Applent AT4532 多通路温度测试仪(深圳市新朗普电子科技有限公司),以 T 型热电偶线为温度探头,以 10 min 为间隔时间进行数据采集和储存。

1.4.2 测点布置 空气温度测点分布:在试验温室和对照温室各布置 6 个测点,用于测定植株冠层温度和基部温度,冠层温度测点位置距离地面 1.5 m,基部温度测点布置于植株基部位置(图 3)。堆体及通风管道内温度测点分布:于堆芯水平方向布置 3 个温度测点,用于测点堆体温度。通风管道内布置 4 个温度测点,分别位于进气管管口、出气管的进气口、中部和出气口位置(图 4)。

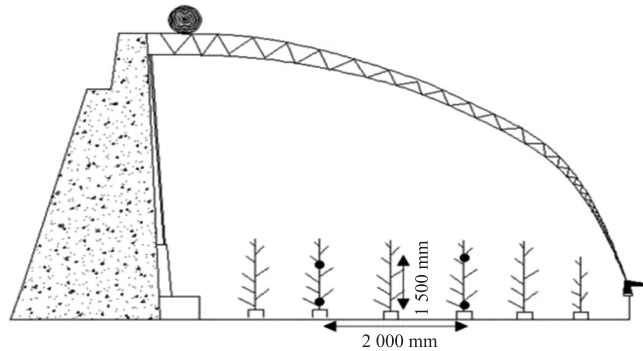
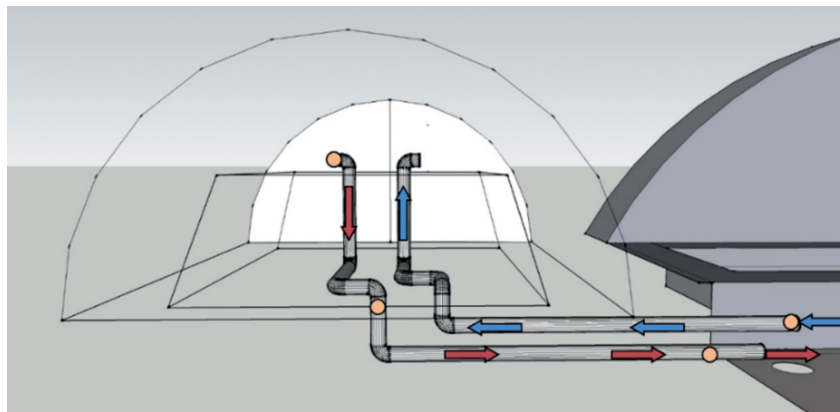


图 3 温室温度测点布置图

Fig. 3 Layout of greenhouse temperature measurement point



● 管道温度测点 Piping temperature measuring point

图 4 通风管道测点位置

Fig. 4 Position of ventilation pipe measuring point

1.4.3 堆体理化性质指标 试验开始后,分别于 3、8、13、18、23、28、33、38、52 d 取气体样品,用气相色谱仪(安捷伦)进行测定,并计算温室气体的排放速率和累计排放量。发酵开始后 1、6、11、16、23、28、33、38、48、68 d 取鲜样,即在堆体的不同方位,表面 50 cm 以下,采用 5 点取样法取样。采集鲜样 100 g,混合均匀后成 2 份,一份鲜样取回后置于 -40 °C 冰箱,用于测定速效氮、pH 值、EC 值,测定仪器分别为 AA3 型流动分析仪(德国 SEAL 公司)、酸碱仪(PB-10,德国赛多利斯公司)、电导率仪(DDS-307A,上海雷磁公司)。按质量比 1:10 浸提鲜样,将 10 mL 浸提液置于培养皿中,并将颗粒饱满的 10 粒番茄种子均匀放置于培养皿内,在 25 °C 环境下进行暗培养 48 h,测定发芽率及根长用于计算种子发芽率(GI)。另一份鲜样烘干测定含水率,将烘干样品研磨后过孔径为 150 μm 筛子,分别采用凯氏定氮法、TOC-L 总有机碳分析仪、马弗炉燃烧法测定全氮、总有机碳、有机质含量等指标。

1.4.4 作物生长指标及品质指标 果实产量测定:选择试验区域内长势一致的 10 株番茄植株挂牌标记,成熟时采收果实并称重,计算单株产量及折合 667 m² 产量。果实品质测定:可溶性固形物、有机酸含量和糖酸比使用 RHBO-90 手持式折射仪测定。可溶性蛋白、维生素 C、番茄红素含量参考高俊凤^[14]的方法测定。

1.4.5 热性能计算 1)有效积温^[15]:

$$\Delta T = (T_i - T_0) \times \Delta t \quad (1)$$

式中: ΔT 为有效积温(°C·h); T_i 为在 i 时刻的堆体温度; T_0 为堆体微生物大量繁殖时的起始温度。

2) 有机质损失率^[16]:

$$\Delta OM = \frac{(OM_{\text{initial}} - OM_{\text{production}}) \times 100}{OM_{\text{initial}}} \quad (2)$$

式中: ΔOM 为有机质损失率; OM_{initial} 为发酵物料初始有机质含量; $OM_{\text{production}}$ 为发酵物料结束时有机质含量。

3) 生物质好氧发酵装置能效比^[17]:

$$COP = \frac{Q_{\text{biotherm}}}{E_{\text{wp}}} \quad (3)$$

式中: COP 为装置运行的能效比; Q_{biotherm} 为发酵过程中产热量; E_{wp} 为装置运行所消耗的电能(MJ)。

4) 日有效积温:

$$DH = (T_{\text{ambient}} - T_{\text{pile}}) \times t \quad (4)$$

式中: DH 为日有效积温($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{ambient} 为环境温度; T_{pile} 为堆体温度; t 为时间。

5) 堆体积累热量^[18]:

$$E_{\text{accumulate}} = (M_{\text{water}} \times C_{\text{water}} + M_{\text{solid}} \times C_{\text{solid}}) \times (T_{i+1} - T_i) \quad (5)$$

式中: $E_{\text{accumulate}}$ 为堆体累积热量($\text{kJ} \cdot \text{d}^{-1}$); M_{water} 为物料中水分(kg); M_{solid} 为物料中固体质量(kg); C_{water} 为水的比热容($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_i 为第*i*天的堆温($^{\circ}\text{C}$); T_{i+1} 为第*i*+1天的堆温($^{\circ}\text{C}$)。

6) 全球增温潜势(GWP)^[19]:

$$GWP = f_{\text{CO}_2} + 25 \times f_{\text{CH}_4} + 298 \times f_{\text{N}_2\text{O}} \quad (6)$$

式中: f 为整个堆肥过程中不同温室气体的排放总量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

7) 发酵产热量^[20]:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{end}} - Q_{\text{m}} \quad (7)$$

式中: Q_{out} 为微生物降解有机物释放的热量($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); Q_{in} 为初始物料能量($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); Q_{end} 为发酵后物料能量($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); Q_{m} 为微生物活动消耗的能量($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。其中 Q_{m} 可忽略不计。

2 结果与分析

2.1 生物质发酵酿热性能与理化性质分析

2.1.1 温度变化 堆体的升温阶段发生在物料堆好后的前 10 d,堆体温度由 9.76°C 升至 51.85°C 。发酵棚体室内气温较外界气温高 $1.56 \sim 5.10^{\circ}\text{C}$,发酵期间平均温度为 1.28°C 。由图 5 可见:采用棚体式发酵装置进行堆肥的高温期(50°C 以上)为 65 d 以上,在 72 d 时达到峰值 64.32°C ,满足《粪便无害化卫生要求:GB7959—2012》。一般情况下,有效积温越大,反应速率越快,当累计积温达到 $10\,000^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$,可认为堆肥基本完成。由图 6 可见:堆体每日积温在前 10 d 快速上升,10~70 d 基本保持在 $4\,000 \sim 4\,200^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ 。发酵周期结束时,每日积温为 $4\,487.6^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$,累计积温为 $302\,760.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$,符合堆肥腐熟标准,并且多余的热量还可被回收利用。

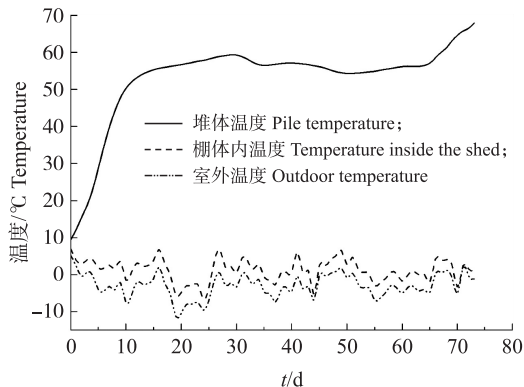


图5 堆体温度变化

Fig. 5 Temperature change of the pile

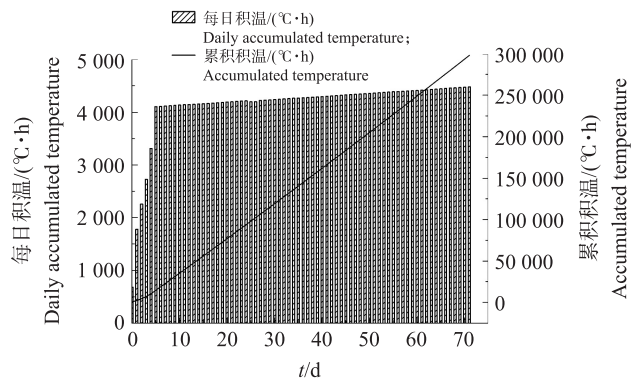


图6 有效积温变化

Fig. 6 Effective accumulated temperature change

堆体产生热量的变化能直观反映堆体的产热效果及可利用的有效热量积累。由图 7 可见:日产热量呈现先迅速上升后逐渐下降的趋势,并在开始发酵的 7 和 17 d 出现峰值,分别为 516 704 和 491 763 kJ,到发酵的 62 d 时,累计产热量以达到 9 977 581 kJ,日均产热量为 201 331 kJ,产热效率为 74.94%,对于废弃物的能源转化率较高。

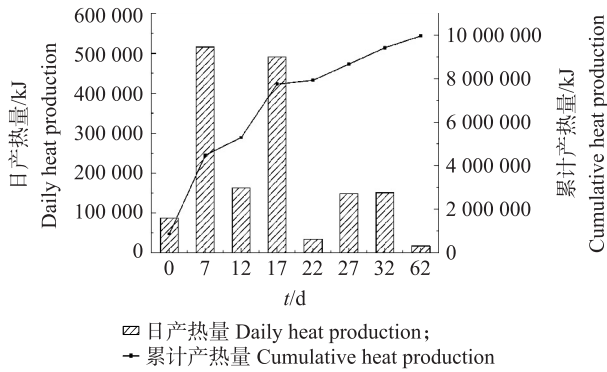


图 7 发酵产热量变化

Fig. 7 Changes in heat yield from fermentation

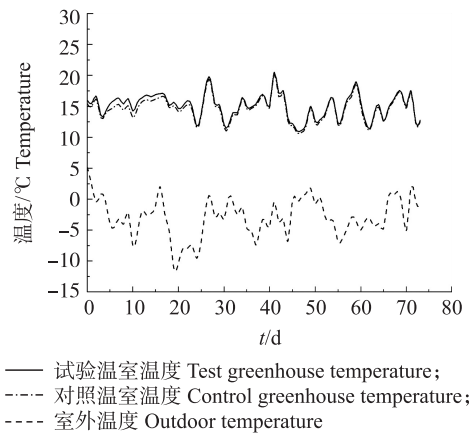


图 8 试验温室和对照温室温度对比

Fig. 8 Comparison of temperature in experimental greenhouse and control greenhouse

2.1.2 生物质发酵装置对温室热环境的影响 如图 8 所示:在发酵前期温差不大,主要是前期没有运行强制换热装置。从发酵开始到高温期(2021-12-30),试验温室日平均温度为 16.64 °C,对照温室的日平均温度为 16.26 °C,温差为 0.18 °C。2022 年 1 月 1 日开始运行强制换热装置,发酵堆体温度上升,试验温室温度明显升高,并显著高于对照温室,在发酵高温期(6~10 d),比对照温室高 1.04 °C 以上。装置运行期间,试验温室和对照温室的日平均温度分别为 15.96 °C 和 14.33 °C。整体上,生物质发酵装置在运行期间酿热效果良好,达到了提高室内空气温度、改善植物生长热环境的作用。

如图 9 所示:在强制换热装置运行的各个时间(每日 17:00 至次日 09:00),管道内部温度变化相对规律,进气管管口、出气管管道内部和气管管口位置温度均呈先上升后下降趋势,出气管进气口温度呈先下降后上升趋势。强制换热装置内管道温度基本不受外界温度的影响,只有在装置运行时管内温度出现变化。测试期间室外夜间(每日 17:00 至次日 09:00)平均温度为 -7.93 °C,出气管端口温度平均为 46.13 °C,受环境因素影响,下降的平均温度为 5.38 °C,下降幅度最大出现在 08:00,为 6.2 °C。出气管管道内部温度和出气管出气口温度,在装置运行期间呈先上升后下降的趋势,与出气管进气口的温度呈负相关。且出气管在经过地下时温度出现了热量传导的情况,导致出气口温度明显低于管道内部温度。出气

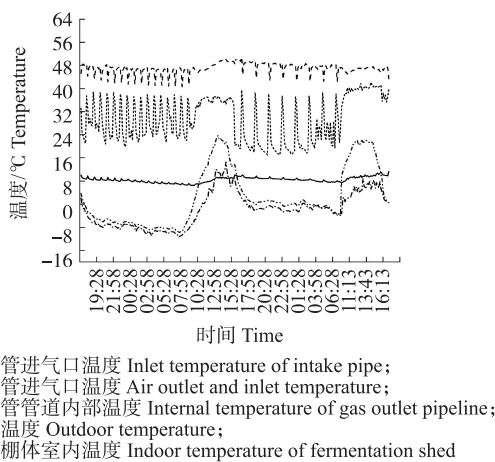


图 9 试验典型晴天(2022-01-08)通气管道温度日变化
Fig. 9 Daily variation of ventilation pipeline temperature during typical sunny days(2022-01-08)

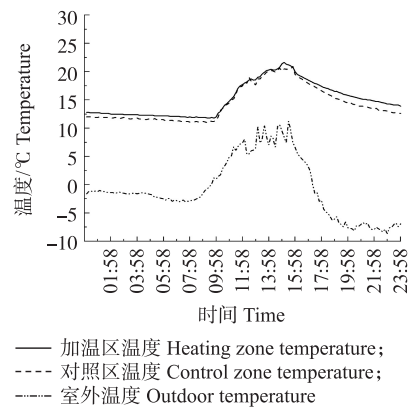


图 10 典型天气试验温室和对照温室植株行间温度对比
Fig. 10 Comparison of inter row temperature between experimental greenhouse and control greenhouse plants during typical weather

管内部温度最高为 11:00 时的 38.2 ℃,平均温度为 28.46 ℃。出气管出气口位置温度变化幅度最大,运行阶段的平均温度为 27.04 ℃,与没有运行时温度相比,温度升高 12.08 ℃,整个装置运行中的热量损失为 41.38%。

通过观察典型晴天(2022-01-08)试验期间加温区植株间与对照行间的温度,结果(图 10)发现,在装置运行期间,试验加温植株行间温度有明显的升高,且呈规律性的变化趋势。发酵装置运行时,生物质堆体产生的热量通过通气管道输送至植物行间。如图 10 所示:行间温度迅速上升,待装置停止运行后,行间温度又呈现下降趋势。在装置运行期间,试验加温区植物行间温度变化幅度为 0.8~1.4 ℃,最高温度出现在 15:08,为 21.6 ℃,平均温度为 15.1 ℃,与对照行间温度相比高 0.74 ℃。说明发酵装置通过间歇式的运行方式能提高植物行间温度,同时能够保证堆体温度不下降,进行持续发酵。

2.1.3 理化性质变化 如表 2 所示:堆体初始含水率为 65.22%,随着发酵进程不断推进,堆体温度不断上升,大量水分以水汽的形式散失,到发酵结束时,含水率为 54.76%,下降了 16.04%。pH 值和电导率变化趋势相同,均呈上升状态,分别由开始时的 9.35 和 1 361.67 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,上升至发酵结束时的 9.76 和 1 558 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

物料在发酵过程中由于堆体水分及有机质含量减少,会出现浓缩效应。全磷、全钾含量均呈现上升趋势,从发酵开始的 4.62、25.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至结束时的 7.17、39.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 2 试验物料理化性质变化

Table 2 Physical and chemical properties change of test materials

指标 Index	堆制前 Before composting	堆制后 After composting	变化率/% Rate of change
全钾含量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total potassium content	25.54	39.33	53.99
全磷含量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total phosphorus content	4.62	7.17	55.19
总有机碳含量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total organic carbon content	336.68	266.43	-20.87
全氮含量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total nitrogen content	15.03	20.90	39.06
碳氮比 C/N ratio	30.40	12.75	-58.06
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) Electrical conductivity	1 361.67	1 558.00	14.42
pH 值 pH value	9.35	9.76	4.39
含水率/% Moisture content	65.22	54.76	-16.04
种子发芽指数 Seed germination index	0.55	0.77	40.00
有机质含量/% Organic matter content	64.94	50.87	-14.07

2.2 生物质发酵对温室气体的影响

由图 11 可知:发酵前期强制换热装置未运行,同时堆体温度较低,造成发酵局部厌氧并产生反硝化反应,使 N_2O 浓度较高。在通风装置运行后,堆体温度上升并迅速达到高温期, N_2O 含量维持在较低水平,在高温期阶段(6~50 d),堆体、试验温室和对照温室的 N_2O 平均浓度分别为 11.99、3.30 和 2.45 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整个发酵期间, N_2O 多在前期产生。在高温期发酵装置供热后,堆体产生的 N_2O 浓度基本和对照温室差别不大,不会对植物生长造成危害。

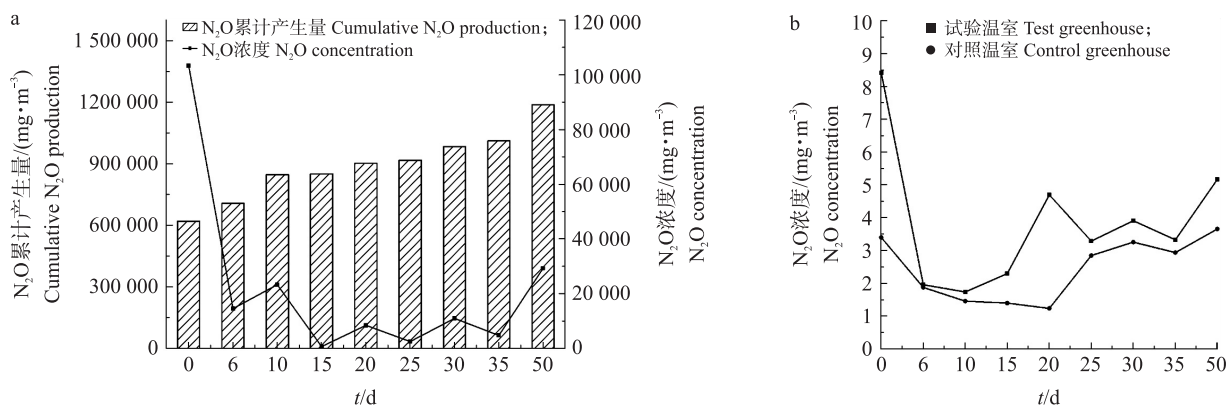


图 11 发酵过程中堆体(a)和温室(b) N_2O 浓度的变化

Fig. 11 Change of N_2O concentration in the pile(a) and greenhouse (b) during fermentation

CH₄ 排放浓度的趋势为先快速上升后迅速下降,之后始终保持在低浓度水平。堆体 CH₄ 排放高峰期集中在堆肥 20 d 之前,然后出现排放峰值。排放高峰期堆体 CH₄ 平均浓度为 11 479.76 mg·m⁻³(图 12)。在发酵周期,经酸性气体过滤装置处理后,试验温室和对照温室 CH₄ 浓度差别不大,分别为 63.97 和 36.99 mg·m⁻³。处理后的 CH₄ 浓度虽然高于正常水平,但对于植物生长不会造成较大影响。

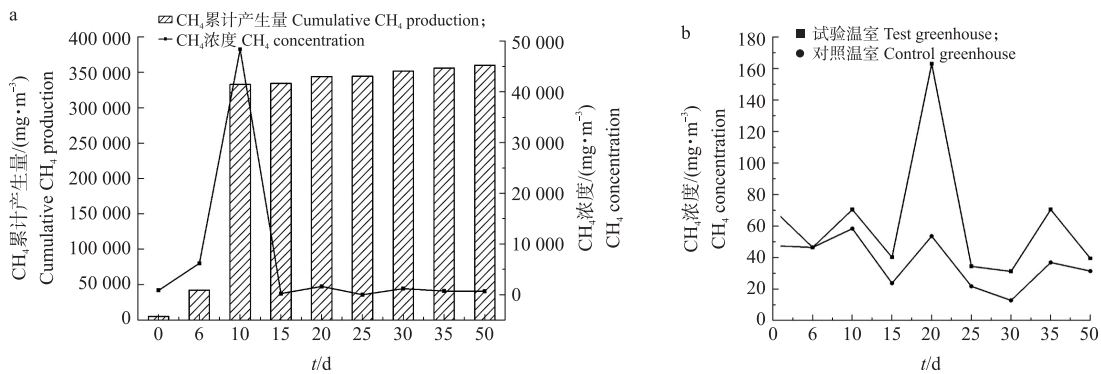


图 12 发酵过程中堆体(a)和温室(b)CH₄ 浓度变化

Fig. 12 Change of CH₄ concentration in the pile(a) and greenhouse(b) during fermentation

CO₂ 是发酵过程中微生物通过分解含碳化合物释放出来的气体,其也是碳素损失的主要方式^[21]。由图 13 可知:在堆肥发酵前 6 d,堆体 CO₂ 浓度最高,且试验温室 CO₂ 在发酵期内浓度始终高于对照温室,其产生高峰期集中在升温期,在 6 d 时达到峰值 7 654.93 mg·m⁻³,其最低值出现在 50 d,其浓度为 4 936.87 mg·m⁻³。对照温室 CO₂ 峰值出现在堆肥 30 d,为 6 537.99 mg·m⁻³,最低值为 10 d 时的 2 400.82 mg·m⁻³。在整个发酵期间,试验温室和对照温室的 CO₂ 日平均排放量分别为 6 388.31 和 4 117.73 mg·m⁻³。表明生物质发酵装置能够补充温室的 CO₂,为植物生长提供气肥。

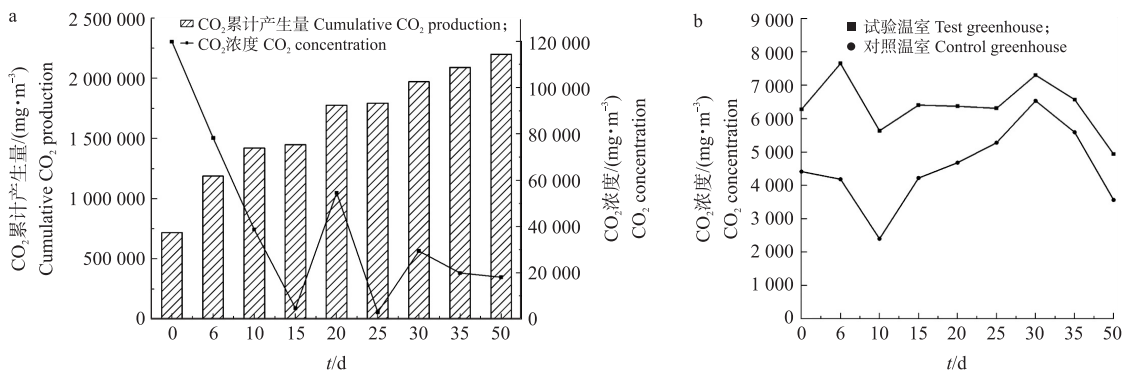


图 13 发酵过程中堆体(a)和温室(b)CO₂ 浓度变化

Fig. 13 Change of CO₂ concentration in the pile(a) and greenhouse(b) during fermentation

本试验将生物质发酵产生的 CO₂ 进行回收用于温室蔬菜生产,并未对大气排放造成环境污染和温室效应,因此试验中全球增温潜势(GWP)指数较未采用气体回收装置的生物发酵系统下降 96.98%,显著减少了温室气体排放,促进设施蔬菜优质增产。

2.3 生物质发酵对温室生产的影响

如表 3 所示:试验区较对照区番茄单株产量提高 5.99%,干果重增加 11.86%。增温补充 CO₂ 对于番茄的品质提升具有显著作用^[22]。

表 3 酿热补气装置对番茄产量的影响

Table 3 Effect of heating and air replenishment device on tomato yield

日期 Date	处理 Treatment	单株产量/g Yield per plant	干果重/g Dry fruit weight
2021-12-10	试验区 Experiment	642.86±25.84 ^b	47.94±0.312 ^b
	对照区 Control	576.70±37.54 ^a	46.17±0.336 ^a
2022-02-17	试验区 Experiment	528.24±30.85 ^a	41.68±0.268 ^b
	对照区 Control	519.36±17.82 ^a	33.33±0.343 ^a

注:不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

由表 4 可知:番茄的可溶性固形物和有机酸含量,试验区明显高于对照区,但是糖酸比两者差别不大,说明加温补气装置运行可以提高番茄果实的口感。试验区的番茄可溶性蛋白、维生素 C 含量以及番茄红素含量显著提高,其中,试验区可溶性蛋白和维生素 C 含量比对照区高 24.6% 和 29.2%,试验区番茄红素含量比对照区高 71.3%。

表 4 酿热补气装置对番茄品质的影响

Table 4 Effect of heating and air replenishment device on tomato quality

处理 Treatment	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	有机酸含量/% Organic acid content	糖酸比 Candy/acid ratio	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹) Soluble protein content	维生素 C 含量/ (mg·g ⁻¹) Vitamin C content	番茄红素含量/ (mg·100 g ⁻¹) Lycopene content
对照区 Control	6.20±0.16 ^b	1.45±0.03 ^b	4.28±0.21 ^a	7.97±0.25 ^b	18.30±0.5 ^b	5.58±0.67 ^a
试验区 Experiment	7.57±0.09 ^a	1.72±0.03 ^a	4.41±0.13 ^a	9.93±0.53 ^a	23.65±0.77 ^a	9.56±0.90 ^b

2.4 生物发酵装置经济效益分析

采用本生物质发酵装置的建造成本为 3 500 元,生产成本为 4 440 元,其中购买发酵原料和人工成本分别为 2 640 和 1 800 元(表 5)。装置运行期间的性能系数(COP)为 32.86,单株产量提高 5.99%,增加收入 8 712 元。同时此试验装置的使用年限为 5 年,每年平均成本约 1 600 元,结合提升品质带来的收益,使用该装置能够在 2 年内收回成本。并且发酵结束时的物料还可应用于温室栽培中,因此装置的生产应用价值较高。

表 5 试验温室和对照温室建造成本、生产成本及经济效益

Table 5 Construction cost, production cost and economic benefit of experimental greenhouse and control greenhouse

温室 Greenhouse	建造成本/元 Construction cost			生产成本/元 Cost of production			产量/ (kg·m ⁻²) Yield	产值/元 Output value	净利润/元 Net profit
	发酵仓体 Fermentation on silo	强制通风装置 Forced heat transfer device	合计 Total	发酵原料 Fermentation raw material	劳动力 Labor costs	合计 Total			
试验温室 Experiment greenhouse	2 300	1 200	3 500	2 640	1 800	4 440	8.60	40 867.2	26 506.86
对照温室 Control greenhouse	0	0	0	0	0	0	8.12	32 155.2	32 524.24

注:净利润=产值-建造成本-生产成本。

Note: Net profit=output value-construction cost-production cost.

3 讨论与结论

温室生物质酿热是依靠可循环能源释放热量与 CO₂, 供给冬季温室作物生长的一项外源加热措施。传统的温室生物酿热往往在温室内采用槽式、行间内置式等装置,成本大且容易引发植物病虫害。本研究采用外置棚体式生物发酵装置,利用太阳辐射为发酵堆体保温,同时在堆体下部铺设通风管道以正负压换气的方式,将堆体产生的 CO₂ 和热量送往温室内部。好氧发酵中的温度变化,是生物质能源转化与利用的重要条件,根据温度特点分为四阶段——中温阶段、嗜热阶段、冷却阶段和腐熟阶段^[19]。经试验验证,采用棚体式发酵装置,堆肥高温期(50 °C 以上)可以保持 65 d 以上,堆体高温期试验温室与对照温室相比,环境气温可提高 1.04 °C 以上。在产热量方面,堆肥本质是一种酶促生物化学反应系统,温度和热量是重要参数,而有效积温是衡量堆温持续时间及强度的一项关键指标^[23]。根据产热公式计算可以得出生物发酵的热量利用与转化效率,经计算试验堆体的日均产热量为 201 331 kJ·d⁻¹,产热效率为 74.94%,说明其对废弃生物能源的利用效率较高。

冬季营造适宜植物生长的气体条件也是设施温室堆肥的一大热门课题。农业废弃物在好氧发酵过程中容易产生 CH₄、N₂O、CO₂、NH₃ 等温室气体,其中 CO₂ 可为温室植物光合作用提供条件,在冬季温室内外气体交换频率减少时,满足植物正常生长。由于纤维素、木质素等物质降解,碳素含量降低、氮素产生浓缩效应,使得堆体 N₂O 浓度呈现小幅上升的趋势^[24]。CH₄ 是一种无色无味气体,也是导致全球变暖的温室气体之一。低浓度的 CH₄ 对人体和植物的危害不大,当空气中甲烷达 25%~30% 时才会使人头晕、乏力,甚至死亡^[25]。堆肥中的 CH₄ 是在厌氧情况下,产甲烷菌还原 CO₂ 和有机化合物产生的^[26]。产甲烷菌往往降解堆体中难降解的纤维素、半纤维素、木质素等物质。过量的 CH₄、N₂O 等气体会影响植物根系生长,

从而影响植物营养和水分运输,同时造成环境污染和温室效应^[27]。本试验中,经过发酵装置的酸性气体过滤系统处理,试验温室和对照温室 N_2O 和 CH_4 浓度差别不大,且 GWP 指数较未采用气体回收装置的生物发酵系统下降 96.98%,显著减少了温室气体排放。温室内补充 CO_2 的试验区域,番茄中可溶性固形物和有机酸含量明显高于对照区,说明此发酵装置运行后可以提高番茄果实的品质。

好氧堆肥可以利用高温杀死大量病原菌,降解农药、抗生素及重金属,但在露天堆肥容易受外界环境因素影响,同时发酵过程中产生的有害气体难以集中处理。因此,近些年许多研究人员开发出适宜室内发酵的堆肥装置。例如:李杰^[28]设计出一种罐状堆肥反应器,可以实时监测并进行反应控制;曹晏飞等^[29]设计出一种主动通风式酿热补气堆肥系统,经试验验证可显著提高试验区域 CO_2 浓度及空气温度。但是目前设施温室好氧发酵装置多采用地埋式/酿热槽式,占用设施耕地面积的同时还易造成温室病虫害等问题。本研究所设计的棚体式发酵装置,在进行大批量农林废弃物处理的同时不占用设施耕地面积,发酵区域与种植区域隔离,不易滋生病虫害影响作物产量及品质,在发酵过程中产生的有害气体可以及时收集处理。因此在设施农业废弃物资源化利用方面具有一定的可行性。

综上,本试验采用棚体式生物质发酵装置,综合利用太阳能维持堆体热量,产热效果较好。50℃以上的高温可持续 65 d,累计产热量可达 9 977 581 kJ,堆体产热效率为 74.94%。将该生物发酵装置应用于日光温室中,在堆肥高温期试验温室较对照温室室温高 1.04℃以上,典型晴天加温区域平均温度为 1.09℃,说明该棚体式发酵装置产热效率高,且增温效果明显。生物质发酵过程中产生的有害气体 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 等通过发酵装置的气体过滤系统的吸附,均可正常通入温室中,未对植物造成有害影响。同时产生的 CO_2 可供植物进行光合作用,在提高作物产量的同时,有效减缓了温室效应。其 GWP 指数较未采用气体回收装置的生物发酵系统下降 96.98%。此装置具有较高的市场推广价值,运行期间的性能系数(COP)为 32.86,植物单株产量提高 5.99%,增加收入 8 712 元,使用寿命预计 5 年。此生物发酵装置可以有效缓解目前农业生产中存在的禽畜粪便污染及秸秆利用率低等问题。但是仍存在不足之处,如发酵棚体入口较小以及机械化操作不便易导致堆体出现局部厌氧及水分含量不均一的问题。同时将堆体热量导入温室内时,通风管出现热量流失而造成温度骤降,增温效果低于预期。

参考文献 References:

- [1] Singh R P, Sharma B, Sarkar A, et al. Biological responses of agricultural soils to fly-ash amendment [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2014, 232: 45-60.
- [2] Hoorweg D, Bhada-Tata P, Kennedy C. Environment: waste production must peak this century [J]. *Nature*, 2013, 502(7473): 615-617.
- [3] Obi F O, Ugwuishiwu B O, Nwakaire J N. Agricultural waste concept, generation, utilization and management [J]. *Nigerian Journal of Technology*, 2016, 35(4): 957.
- [4] Permadi D A, Kim Oanh N T, Vautard R. Integrated emission inventory and modeling to assess distribution of particulate matter mass and black carbon composition in Southeast Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(4): 2725-2747.
- [5] Lasko K, Vadrevu K. Improved rice residue burning emissions estimates: accounting for practice-specific emission factors in air pollution assessments of Vietnam [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 795-806.
- [6] Li H T, Miao Z, Zhang B. Review and prospect of comprehensive straw utilization and government policy in China [J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2022, 20(4): 402-406.
- [7] Wang Y Z, Zhang Y L, Li J X, et al. Biogas energy generated from livestock manure in China: current situation and future trends [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113324.
- [8] Reddy K R, Harihanandh M, Murali K. Strength performance of high-grade concrete using rice husk ash (RHA) as cement replacement material [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 8822-8825.
- [9] 柏萍. 调控空气相对湿度对温室甜瓜和番茄生长、水分状态及产量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Bai P. The effect of regulating relative humidity of air on the growth, water status, and yield of greenhouse melon and tomato [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [10] Yao X F, Zhou H B, Meng H B, et al. Amino acid profile characterization during the co-composting of a livestock manure and maize straw mixture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123494.
- [11] van Hoang V, Tran K T, van Tu B, et al. Agricultural competitiveness of Vietnam by the RCA and the NRCA indices, and consistency of competitiveness indices [J]. *Agris on-Line Papers in Economics and Informatics*, 2017, 9(4): 53-67.
- [12] 孔政. 农业废弃物发酵对温室环境影响的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Kong Z. Study on the effects of fermentation of agricultural wastes on the environment of greenhouse [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese with English abstract).

- [13] 王斌,张硕,陈剑峰. 有机废弃物生物发酵法 CO₂ 施肥对大棚草莓的效果[J]. 中国土壤与肥料,2011(4):65-68.
Wang B,Zhang S,Chen J F. Effects of CO₂ enrichment by biological fermentation of organic wastes on strawberry in the greenhouse[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2011(4):65-68(in Chinese with English abstract).
- [14] 高俊凤. 2%氨基寡糖素水剂防治番茄病毒病田间药效试验[J]. 现代农村科技,2012(13):53.
Gao J F. Field efficacy test of 2% amino oligosaccharide aqueous solution against tomato virus disease[J]. Modern Rural Science and Technology,2012(13):53(in Chinese).
- [15] 陈同斌,黄启飞,高定,等. 城市污泥好氧堆肥过程中积温规律的探讨[J]. 生态学报,2002,22(6):911-915.
Chen T B,Huang Q F,Gao D, et al. Accumulated temperature as an indicator to predict the stabilizing process in sewage sludge composting[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(6):911-915(in Chinese with English abstract).
- [16] Wang T T,Wang S P,Zhong X Z, et al. Converting digested residue eluted from dry anaerobic digestion of distilled grain waste into value-added fertilizer by aerobic composting[J]. Journal of Cleaner Production,2017,166:530-536.
- [17] 李金平,董玉慧,李彩军,等. 寒冷地区空气源热泵辅助太阳能热水器供暖性能[J]. 上海交通大学学报,2023,57(7):910-920.
Li J P,Dong Y H,Li C J, et al. Performance of solar vacuum tube water heater-air source heat pump system in cold area[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2023,57(7):910-920(in Chinese with English abstract).
- [18] Ge J Y,Huang G Q,Huang J, et al. Particle-scale modeling of oxygen uptake rate during pig manure-wheat straw composting: a new approach that considers surface convection[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2016,97:735-741.
- [19] Nicola G D,Tomassetti S,Pierantozzi M, et al. Semi-empirical correlations and an artificial neural network for liquid dynamic viscosity of low GWP refrigerants[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2022,1106:012018.
- [20] 王锦彪,杨立中,张列宇,等. 猪粪与秸秆协同发酵产热及溶解性有机质的转化特征[J]. 环境科学研究,2013,26(2):194-201.
Wang J B,Yang L Z,Zhang L Y, et al. Pig manure and straw ferment produce heat collaboratively and transformation of dissolved organic matter[J]. Research of Environmental Sciences,2013,26(2):194-201(in Chinese with English abstract).
- [21] 杨帆,欧阳喜辉,李国学,等. 膨松剂对厨余垃圾堆肥 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(18):226-233.
Yang F,Ouyang X H,Li G X, et al. Effect of bulking agent on CH₄,N₂O and NH₃ emissions in kitchen waste composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(18):226-233(in Chinese with English abstract).
- [22] 戴相林,刘雅辉,孙建平,等. 秸秆还田和氮肥减施对滨海盐渍土稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. 应用与环境生物学报,2023,29(4):994-1005.
Dai X L,Liu Y H,Sun J P, et al. Combined effects of straw return and reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and nitrogen use efficiency in a coastal saline paddy field[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2023,29(4):994-1005(in Chinese with English abstract).
- [23] 宝剑锋. 大孔吸附树脂对堆肥过程中抗生素抗性基因及细菌群落的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
Bao J F. Effects of macroporous adsorption resin on antibiotic resistance genes and the bacterial community during composting[D]. Yangling: Northwest A&F University,2020(in Chinese with English abstract).
- [24] 杨玉欣. 蔬菜残体堆肥化过程中理化性质和酶活性的动态变化[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
Yang Y X. Dynamic changes of physicochemical properties and enzyme activities during composting of vegetable residues[D]. Yangling: Northwest A&F University,2019(in Chinese with English abstract).
- [25] Wang J Q,Liu Z P,Xia J S, et al. Effect of microbial inoculation on physicochemical properties and bacterial community structure of citrus peel composting[J]. Bioresource Technology,2019,291:121843.
- [26] 刘超. CO₂ 浓度升高对稻田碳通量及综合增温潜力的影响[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.
Liu C. Effects of elevated CO₂ concentration on carbon flux and comprehensive global warming potentials in paddy fields[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2022(in Chinese with English abstract).
- [27] 殷学云,杨茂元,崔海成,等. 非耕地日光温室生物质发酵 CO₂ 施肥及促光合诱剂使用技术[J]. 农业工程技术,2016,36(28):31-32.
Yin X Y,Yang M Y,Cui H C, et al. Techniques for CO₂ fertilization by biomass fermentation and application of photosynthetic inducer in non-cultivated solar greenhouse[J]. Agricultural Engineering Technology,2016,36(28):31-32(in Chinese).
- [28] 李杰. 环保立式发酵罐控制系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
Li J. Research on environment-friendly vertical fermenter control system[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2019(in Chinese with English abstract).
- [29] 曹晏飞,石苗,王笛,等. 非对称保温塑料大棚内主动通风式酿热补气系统应用初探[J]. 农业工程学报,2022,38(6):204-212.
Cao Y F,Shi M,Wang D, et al. Application of an active ventilation fermentation heating and supplemental gas system in asymmetric plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(6):204-212(in Chinese with English abstract).