doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.035

寒区农村户用好氧堆肥系统设计与试验

王丽丽[1,2]　郑京克[1]　徐名汉[3,4]　冯子阔[1]　王忠江[1,2]　宗丹丹[1]

（1.东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030；2.黑龙江省寒地农业可再生资源利用技术及装备重点实验室，哈尔滨 150030；
3.中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；4.农业装备技术全国重点实验室，北京 100083）

摘要：好氧堆肥适宜处理农村散点堆积的餐厨垃圾、畜禽粪便、农业秸秆等多种有机废弃物，但目前小型户用好氧堆肥系统难以在寒区冬季室外稳定运行，且缺乏配套的通风策略，限制堆肥效果提升。本文联合太阳能蓄热与供电、双舱室和蓄热水箱保温等方式，设计适于寒区农村户用的好氧堆肥系统，研究不同环境温度下好氧堆肥的温升规律及堆肥特性，并探索通风优化策略及臭气减排途径。结果表明：该设计可实现堆肥舱室昼夜温度的有效维持，也可预热通风空气，保证好氧堆肥稳定运行，当环境温度为 15～30℃、0～15℃、－25～0℃时，堆肥舱室内实际温度达 21.9～45℃、15.7～32.4℃、13.5～23.8℃；好氧堆肥前 11 d，通风速率 25 L/(m³·min)时的持续通风最优，当环境温度为 15～30℃、0～15℃、－25～0℃时，堆体实际最高温度达 62.3、56.4、55.2℃；11 d 后，通风速率 25 L/(m³·min)、氧气浓度 14%～17%调控下的动态通风更适于－25～0℃的低温环境，堆肥 21 d 时种子发芽率达 89.89%，且好氧堆肥过程未产生用电成本；秸秆对堆肥尾气中的氨气具有良好的净化效果，去除率达 80%～95%。研究结果可为寒区农村户用好氧堆肥全年稳定运行及生态环境改善提供基础依据。

关键词：好氧堆肥；农村户用；寒区；太阳能；通风优化；臭气减排

中图分类号：S216　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)02-0364-11　　**OSID**：

Design and Experiment of Aerobic Composting System for Rural Households in Cold Regions

WANG Lili[1,2]　ZHENG Jingke[1]　XU Minghan[3,4]　FENG Zikuo[1]　WANG Zhongjiang[1,2]　ZONG Dandan[1]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Heilongjiang Key Laboratory of Agricultural Renewable Uitilization and Equipment for Cold Regions*, *Harbin* 150030, *China*
3. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100083, *China*
4. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aerobic composting is effective for processing various organic wastes, such as kitchen scraps, domesticated animal manure, and agricultural straw, commonly found in rural areas. However, maintaining a stable small-scale household aerobic composting system outdoors during winter in cold regions poses significant challenges, and there is a lack of a suitable ventilation strategy. An aerobic composting system tailored for rural households in the cold regions was designed, integrating solar thermal storage and power supply, double chambers, and an insulated thermal storage tank. The temperature rises and composting characteristics during the aerobic composting process across different ambient temperatures were studied, while exploring optimal ventilation and odor reduction strategies. The results showed that the design effectively maintained stable temperatures in the composting chamber throughout the day and night, while also achieving preheating of the ventilation air, ensuring the stable operation of aerobic composting. The actual temperatures inside the composting chamber reached 21.9 ~ 45℃, 15.7 ~ 32.4℃, and 13.5 ~ 23.8℃ under ambient temperatures of 15 ~ 30℃, 0 ~ 15℃, and －25 ~ 0℃, respectively. A continuous ventilation rate of 25 L/(m³·min) proved optimal during the first 11 d, with maximum temperatures in the compost pile reaching 62.3℃, 56.4℃, and 55.2℃ at ambient temperatures of 15 ~ 30℃, 0 ~ 15℃, and －25 ~ 0℃, respectively. For low-temperature environments

收稿日期：2025－07－15　修回日期：2025－08－16

基金项目：国家重点研发计划项目(2025YFD1700200)、国家自然科学基金-区域创新发展联合基金项目(U21A20162)和黑龙江省自然科学基金联合基金重点项目(ZL2024E002)

作者简介：王丽丽(1979—)，女，教授，博士生导师，主要从事农业生物环境与能源工程研究，E-mail：wanglili22663@163.com

below 0℃ after the initial 11 d, implementing a dynamic ventilation strategy with a rate of 25 L/(m^3·min) and maintaining oxygen concentrations between 14% and 17% proved beneficial. By the end of the 21 d aerobic composting at an ambient temperature from −25℃ to 0℃, the germination index reached 89.89%. In addition, the aerobic composting process incurred no electricity costs. Straw effectively purified the ammonia in the exhaust from aerobic composting, achieving a removal rate from 80% to 95%. The findings can serve as a foundation for enhancing the stable operation of aerobic composting and improving the ecological environment for rural households in cold regions.

Key words: aerobic composting; rural households; cold regions; solar energy; ventilation optimization; odor reduction

0　引言

近年来,我国农村生活垃圾年产量已突破 3×10^8 t,约占全国生活垃圾总量的 55%[1]。其中,富含淀粉、纤维素、脂肪和蛋白质等易腐有机物的餐厨垃圾,占农村生活垃圾总量的 50% 以上[2],若得不到及时就地处理,易引发环境污染和健康风险。此外,农村地区各家各户分散养殖猪、牛、鸡等畜禽,若畜禽粪便处理不当会造成蚊蝇滋生,雨季污水四溢。同时,农村地区也是农业秸秆的聚集地,除炊事、饲牛等用途外,多数是散点随意堆积。因此,高效就地解决农村散点堆积的多种有机废弃物是改善农村生态居住环境和卫生健康的关键。

好氧堆肥不仅能有效实现有机废弃物的减量化,还能产生优质的有机肥料,且堆体规模可灵活调整,适宜处理农村地区分散的多种有机废弃物。但目前小型户用堆肥装置普遍仅采取简易保温措施[3],当环境温度较低时,尤其在地处北方寒区的秋冬季节,好氧堆肥无法稳定运行。基于此,有研究针对好氧堆肥专门设计半透膜覆盖、加热垫等[4-5]多种形式的保温增温系统,但半透膜成本及加热垫电耗均较高。JIANG 等[6]设计太阳能供电增温系统并基于数学模型模拟得到,环境温度 5~30℃ 下,堆体最高理论温度可达 60℃,但缺乏实际环境下的效果验证。此外,小型户用好氧堆肥的通风通常是在反应器上设置通气孔,通过人工转动实现自然对流通风,但易导致堆肥升温阶段需氧量大时通风不足,难以达到堆肥温升要求[7]。而且,农村好氧堆肥原料多样化,农户操作相对粗放,物料配比难以精确定量化,含水率、碳氮比(C/N)等参数波动较大,自然对流通风无法满足不同物料的实际需氧量,经常导致好氧堆肥失败。因此,增设通风系统对户用好氧堆肥的稳定运行具有重要意义。

文献[8-9]分别针对滚筒、圆柱等小型好氧堆肥装置设计通风系统,并获得了不同的较优通风速率,但采用固定速率的连续或间歇通风,堆肥过程中通风速率保持不变。然而,好氧堆肥的通风过程受原料特性、堆体尺寸及自然环境温度等因素的影响,且不同堆肥阶段微生物的需氧量差异较大,固定通风速率下的供氧量与不同阶段微生物的实际需氧量可能并不匹配,易导致堆肥升温期、高温期供氧不足或腐熟期通风热损失过大[10]。而且,当环境温度随季节、昼夜等自然因素波动较大时,若冷空气的冲击超过微生物的耐受能力则极易造成堆肥失败。陈同斌等[11]发现,在升温期和高温初期停止通风,堆体内氧量仅可维持 5 min,而在高温后期、腐熟期停止通风,堆体内氧量可分别维持 30、50 min。王丽丽等[3]在环境温度 7.1~8.6℃ 回收利用堆肥废气余热,并用于预热通风空气,显著降低了冷空气对微生物的冲击,堆体 50℃ 以上的高温期可达 5.61 d,但仍无法在 0℃ 以下的冬季室外稳定运行。因此,解决低温环境下好氧堆肥过程的低成本保温增温问题,同时实现通风供氧与微生物需氧的适配及缓解冷空气的冲击是提高好氧堆肥效率的关键瓶颈,但相关研究很少,仍缺乏适于寒区冬季农村户用的小型好氧堆肥系统及配套通风策略。

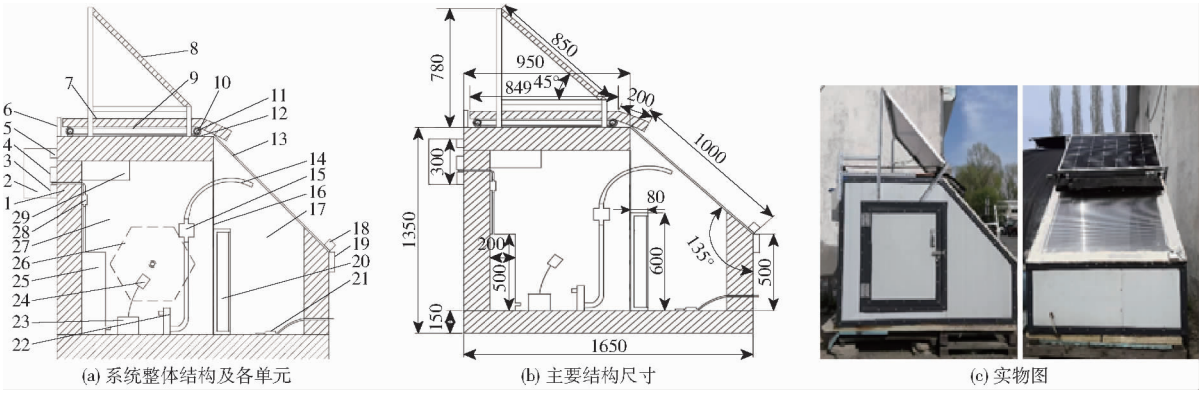
针对寒区农村散点堆积的多种有机废弃物处理问题,本研究充分利用太阳能蓄热与供电、双舱室保温、通风空气预热等方式,设计一套可在寒区冬季室外稳定运行的好氧堆肥系统。同时,采用分段动态通风策略,即根据好氧堆肥不同阶段微生物的实际耗氧需求,通过实时监控尾气中的氧浓度实现按需通风,从而降低环境温度较低或昼夜温差较大时冷空气的冲击,解决好氧堆肥通风不足或过度通风问题,并增设基于秸秆吸附的尾气处理单元,降低臭气排放,为北方寒区农村户用好氧堆肥全年低成本稳定运行及生态环境改善提供基础依据。

1　好氧堆肥系统设计

1.1　系统结构

好氧堆肥系统由太阳能供电系统、保温系统、通风系统、堆肥系统和尾气处理系统 5 部分组成。其中,太阳能供电系统由太阳能电池板、宽脉调控器和蓄电池组成;保温系统由气体缓冲舱、堆肥

舱、采光板、保温幕帘、蓄热水箱、光敏开关、导轨链条、电机、电机控制器和单向气体导通阀构成；通风系统由风机、通风管道、转子流量计、氧气传感器、通风控制器和单向气体导通阀组成；堆肥系统由堆肥反应器、通风管道和温度传感器组成；尾气处理系统由废气处理箱和单向气体导通阀构成。系统整体结构及各单元和堆肥反应器结构示意图如图 1、2 所示。

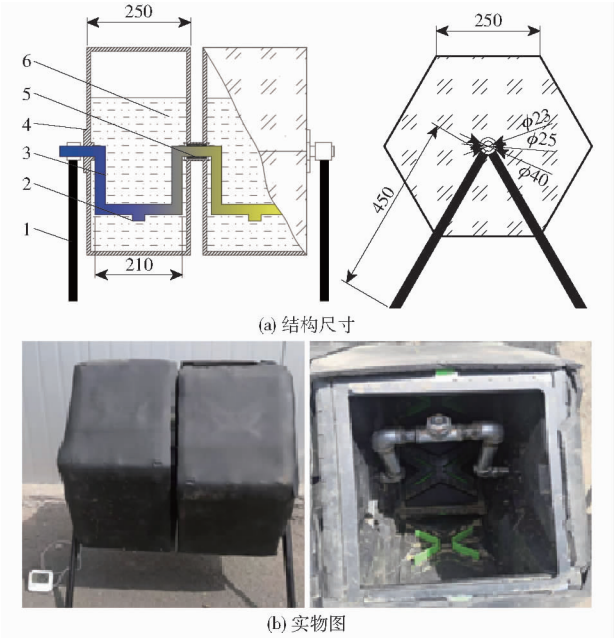


(a) 系统整体结构及各单元　(b) 主要结构尺寸　(c) 实物图

图 1　好氧堆肥系统结构尺寸及实物图

Fig. 1　Overall structure and dimensions of composting system

1. 外壳　2. 仪表箱　3. 光敏开关　4. 电机控制器　5. 宽脉调控器　6. 后置限位器　7. 保温幕帘　8. 太阳能电池板　9. 传动链条　10. 幕帘收放电机　11. 齿轮　12. 电机固定器　13. 采光板　14. 通风管道　15. 风机　16. 舱室隔断　17. 单向气体导通阀　18. 前置限位器　19. 光敏传感器　20. 蓄热水箱　21. 气体缓冲舱　22. 转子流量计　23. 通风控制器　24. 氧气传感器　25. 废气处理箱　26. 堆肥反应器　27. 堆肥舱　28. 单向气体导向阀　29. 蓄电池



(a) 结构尺寸

(b) 实物图

图 2　双箱式堆肥反应器结构尺寸及实物图

Fig. 2　Schematic structure and dimensions of two-box composting reactor

1. 支架　2. 网状通风口　3. 通风管道　4. 反应器箱体　5. 滚针轴承　6. 堆肥物料

太阳能供电系统由太阳能电池板、宽脉调控器、充电蓄电池组成，可为保温幕帘收放电机及通风系统电机、风机及氧气传感器、通风控制器等用电设备供电，好氧堆肥过程无需外加电源。保温系统中舱室隔断、采光板均为聚碳酸酯中空板，保温幕帘为丁腈橡胶保温棉，保温壳体均为聚氨酯(Polyurethane，PU)保温板。在白天有阳光时，通过采光板吸收太阳光辐射热量以加热气体缓冲舱内的空气，同时不锈钢蓄热水箱吸收加热后的空气热量进行蓄热，水箱长、宽、高和厚度分别为 900、80、600、3 mm，有效容积为 40 L，水箱表面喷涂厚 2 mm 的 PU 吸热涂层。在夜间或阴雨天环境温度较低以及夏季温度过高时，通过幕帘覆盖采光板进行保温及隔热，同时蓄热水箱可将白天储存的热量释放，保证夜间缓冲舱内空气温度不随外界气温降低而产生较大波动。堆肥舱内置放堆肥反应器及配套通风系统，通风时抽取气体缓冲舱内通过光照预热后的空气进行通风，可有效降低冷空气对堆体的冲击，同时气体缓冲舱内产生的负压可自动开启压差驱动的单向导气阀抽入外界空气。流经堆体排出尾气温度较高，将其滞留在堆肥舱内可起到保温作用，当堆肥舱内滞留的尾气与外界大气压差达 50 Pa 时，自动开启单向阀，将尾气流经废气处理箱内的秸秆介质，脱除氨气后排出，秸秆介质粒径、含水率、填装量和初始密度分别为 2～3 mm、15%、5 kg 和 65.75 kg/m^3。

好氧堆肥过程采用温度传感器实时监控气体缓冲舱、堆肥舱及堆肥反应器内物料温度；采用光敏传感器实时监测采光板底部位置的光照强度，当光照强度过大或过低，达到设定阈值上限(3 500 lx)或下限(150 lx)并持续超过 90 min 时可自动开启幕帘控制电机，启动幕帘覆盖采光板进行避光或保温，避免气体缓冲舱内温度过高或过低。堆肥反应器包括 2 个独立发酵箱，可根据发酵物料量进行单箱或双箱

发酵，发酵箱外包裹厚 150 mm 的 PU 保温材料。发酵箱为棱长、长度均为 250 mm 的硬质塑料六棱柱体，总容积和物料装填率分别为 80 L 和 70% ~ 80%。发酵箱两端固定转轴，箱体可绕轴自由转动，实现物料有效搅拌，堆肥过程每 24 h 搅拌 1 次、每次转动 10 圈。堆肥反应器内呈“几”字形的不锈钢通风管道直径为 25 mm。

1.2　能量平衡分析

1.2.1　能量输入

好氧堆肥过程能量输入全部来源于太阳辐射，太阳辐照度 I_θ 计算式[12-13]为

$$I_\theta = I_{D\theta} + I_{d\theta} + I_{R\theta} \tag{1}$$

其中

$$I_{D\theta} = I_\theta \cos\theta \tag{2}$$

$$I_{d\theta} = \frac{1}{2} I_n \sin\beta \frac{1 - P^m}{1 - 1.4\ln P} \frac{1 + \cos A}{2} \tag{3}$$

$$I_{R\theta} = \frac{\rho_g (I_{Dh} + I_{dh})(1 - \cos A)}{2} \tag{4}$$

$$I_n = S \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 P^m \tag{5}$$

$$m = \frac{1}{\sin\beta} \tag{6}$$

$$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi n}{365} \tag{7}$$

$$\sin\beta = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta \tag{8}$$

$$\delta = 23.45 \sin(0.986\,3(284 + n)) \tag{9}$$

$$\omega = 0.25[T_{standartime} + 4(\varphi_{local} - \varphi_{st}) + E - 720] \tag{10}$$

$$E = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{11}$$

$$B = \frac{360(n - 81)}{365} \tag{12}$$

式中　$I_{D\theta}$——倾斜面上太阳直射辐照度，W/m²

$I_{d\theta}$——倾斜面上太阳散射辐照度，W/m²

$I_{R\theta}$——倾斜面上反射辐照度，W/m²

I_n——法向入射太阳辐照度，W/m²

θ——太阳入射角，(°)

β——太阳高度角，(°)

P——大气质量，基于天气晴朗程度在 0.50 ~ 0.85 范围取值

m——大气透明系数

A——采光板斜面与地面夹角，取 45°

ρ_g——地面平均反射率，通常取 0.2，雪面取 0.7

S——太阳常数，取 1 353 W/m²

$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2$——日地距离修正系数

n——每年中的第 n 天

φ——当地纬度，哈尔滨取 45°

δ——赤纬角，(°)

ω——太阳时角，(°)

$T_{standartime}$——标准时，min

φ_{local}——当地经度，哈尔滨取 127°

φ_{st}——标准经度，取 120°

E——时差，min　　B——太阳年角，(°)

以 2023 年 12 月 31 日为例计算，当日白天室外天气晴，阳光充足，大气质量较优，P 取 0.8，最高、最低气温分别为 -15、-21℃；测试地点为黑龙江省寒地农业可再生资源利用技术及装备重点实验室。基于式(1) ~ (12)得到采光板斜面上 07:00—16:00 时段逐时的太阳辐照度 I_θ，分别为 33.19、361.88、645.30、835.33、926.76、916.70、805.49、596.54、296.00、3.21 W/m²。通过梯形积分法计算采光板斜面上单位面积太阳辐照度(H)，计算式为

$$H = \sum_{i=1}^{n_2 - 1} \frac{(G_i + G_{i+1})}{2} a \Delta t \tag{13}$$

式中　G_i——i 时刻瞬时辐照度，W/m²

G_{i+1}——$i+1$ 时刻瞬时辐照度，W/m²

Δt——时间间隔，h

a——单位转换常数，取 0.003 6

计算得 H 为 19.45 MJ/m²，采光板面积、透光度分别为 0.70 m²、0.9。因此，该好氧堆肥系统 31 日 07:00—16:00 时段通过采光板获得的能量输入为 12.25 MJ。

1.2.2　热量损失

好氧堆肥过程热量损失包括通过围护结构(保温壳体、采光板和保温幕帘)的导热损失、内壁对流热损失、外表面对流和辐射热损失及堆肥尾气排出堆肥舱时带走的热量损失。保温壳体所用 PU 材料的泡沫结构致密且封闭气泡占比高，能有效消除内部空气的宏观流动，显著抑制对流，同时低温环境下通过辐射产生的传热损失非常有限。UMBERTO[14]针对 PU 材料在 -20 ~ 30℃的散热分析得到，导热损失在总热量损失中的占比超过 80%，显著高于对流和辐射热损失。此外，由于对流、辐射热阻在多孔材料中无法通过试验直接获取，需基于多相传热模型或有效热导率拟合模型进行模拟估算。因此，该热量损失分析是将内、外壁对流换热系数假设为 $+\infty$，即内、外壁温度等于其分别接触的空气温度，可分别假设为堆肥舱内所需的理论温度和外界实际最低环境温度；热量损失计算过程以传导热阻为主导，将全部热损失合并为热传导，该方法简单易行，适于设计初期判断保温系统的理论可行性。此外，保温壳体底部采用多层 PU 保温板，底部导热损失

可忽略不计,且好氧堆肥过程匹配的较优通风速率尚未确定,无法精确计算尾气排出堆肥舱时产生的热损失。因此,仅考虑好氧堆肥未启动条件下,白天和夜间不同时段保温壳体、采光板及幕帘导热损失,计算式为

$$Q = \sum_{k=1}^{N} \mu_k A_k (t - t_0) \tag{14}$$

其中

$$\mu_k = \frac{1}{R_k} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_1} \frac{\delta_{kj}}{\lambda_{kj}}} \tag{15}$$

式中 Q——总导热损失,W

μ_k——第 k 种围护结构导热系数,W/(m·K)

A_k——第 k 种围护结构导热面积,m^2

t——气体缓冲舱和堆肥舱温度,℃

t_0——外界大气环境温度,取 31 日当天最低温度 -21℃

N——围护结构数量

R_k——第 k 种围护结构总热阻,$(m^2 \cdot K)/W$

δ_{kj}——第 k 种围护结构中第 j 种材料厚度,m

λ_{kj}——第 k 种围护结构中第 j 种材料导热系数,W/(m·K)

n_1——围护结构中不同材料层数

由于好氧堆肥未启动,假设 2 个舱室温度相等,为 15℃;测试当日白天未启动幕帘,夜间启动幕帘,围护结构包括保温壳体、采光板和采光板-幕帘 3 种。保温壳体导热系数为 0.02 W/(m·K),面积为 4.97 m^2,厚度为 150 mm;采光板导热系数为 0.03 W/(m·K),面积为 0.70 m^2,厚度为 10 mm;幕帘导热系数为 0.03 W/(m·K),面积为 0.70 m^2,厚度为 50 mm[15]。基于式(14)、(15)得到,保温壳体当日总散热量为 2.06 MJ,07:00—16:00 时段采光板散热量为 2.72 MJ,17:00—次日 06:00 时段采光板-幕帘散热量为 0.64 MJ,好氧堆肥系统当日总热量损失为 5.42 MJ,低于当日通过采光板输入的能量,说明该保温系统在环境温度 -21℃下理论上能够保证气体缓冲舱和堆肥舱温度至少维持在 15℃左右。

1.2.3 蓄热水箱温度和散热量

针对寒区冬季夜间环境温度相对更低、气体缓冲舱和堆肥舱降温更快的问题,该设计在气体缓冲舱内增设蓄热水箱。基于以上计算得到的 31 日通过采光板获得的能量输入为 12.25 MJ,07:00—16:00 时段采光板和保温壳体散热量为 3.58 MJ 时,水箱所在的气体缓冲舱通过采光板获得的净能量输入为 8.67 MJ,水箱吸热涂层集热效率为 0.8,水箱理论有效集热量为 6.94 MJ。水箱内液体为氯化钙防冻剂,比热容为 3.4 kJ/(kg·K),质量为 40.82 kg,基于有效集热量与防冻剂质量及其比热容乘积的比值计算得到,水箱有效集热量可使防冻剂升高 50℃。由于热量损失计算过程假设气体缓冲舱温度为 15℃,加上水箱有效集热量使防冻剂提升的 50℃,可假设防冻液初始温度为 65℃。基于式(15)得到的箱体总传热系数为 2.0 W/(m^2·K),基于式(14)得到的17:00—次日 06:00 时段水箱的逐时散热量,以及基于逐时散热量与防冻剂比热容及其质量乘积的比值计算得出防冻剂逐时温度降低量,水箱温度可从 65℃降至 33.17℃,降幅为 31.83℃,17:00—次日 06:00 时段水箱总放热量为 4.49 MJ,高于该时段保温壳体和采光板-幕帘总散热量(1.84 MJ)。因此,通过水箱白天蓄热、夜间散热理论上可行。此外,当夏季环境温度较高时,为避免水箱及气体缓冲舱温度过高,水箱内防冻剂可更换为纯水。

2 试验材料与方法

2.1 试验原料

好氧堆肥原料选取餐厨垃圾和玉米秸秆,餐厨垃圾取自东北农业大学棘园餐厅,剔除骨头、塑料等难以降解的杂质后 -20℃冷冻备用;玉米秸秆取自东北农业大学试验田,风干后粉碎至 2~3 mm 密封备用。好氧堆肥适宜的初始 C/N 和含水率通常为 27~30 和 55%~60%,将餐厨垃圾与玉米秸秆以干物质质量比 3∶1混合后作为堆肥物料,餐厨垃圾、玉米秸秆及混合物料基本特性如表 1 所示。

表 1 餐厨垃圾、玉米秸秆及混合物料基本特性

Tab.1 Basic characteristics of kitchen waste, corn straw, and mixed feedstock

参数	餐厨垃圾	玉米秸秆	混合物料
含水率/%	72.0±0.5	8.05±0.30	56.41±0.50
总碳质量分数/%	43.5±0.5	35.1±0.5	37.5±0.4
总氮质量分数/%	1.75±0.02	0.68±0.06	1.16±0.03
C/N	24.9±0.2	51.7±0.1	32.16±0.20
pH 值	4.3±0.2	8.0±0.5	4.42±0.30
有机质含量/(g·kg^{-1})	921.7±1.3	655.4±0.8	916.4±1.1

2.2 试验设计与方法

不同堆肥原料理化特性差异较大,其适配的通风速率也不同。文献[16-17]分别针对餐厨垃圾、污泥好氧堆肥提出通风速率为 36.67、50 L/(m^3·min)。经团队前期预试验发现,由于堆肥反应器有效容积较小,当通风速率高于 50 L/(m^3·min)时,堆肥难以正常运行[3]。此外,在动态通风过程中,氧浓度控制阈值越接近空气中的氧浓度(体积

分数，约 21%），通风时间则越长[18]；而黄金枝等[19]报道，当氧浓度低于 10% 时，好氧堆肥易处于厌氧状态。也有研究针对不同堆肥反应器提出 5% ~ 20%、10% ~ 18%、14% ~ 17%、15% ~ 20%[20-21]的氧浓度调控范围。试验于 2023 年 11 月 30 日—2024 年 2 月 28 日进行，具体包括 4 部分内容：

（1）在 0 ~ 15℃ 环境温度、连续通风条件下，研究通风速率对堆肥温升及堆肥效果的影响，通风速率 5、15、25、35、45 L/（m^3·min）分别记为 A1、A2、A3、A4 和 A5。

（2）基于内容（1）获得的较优通风速率，在 0 ~ 15℃ 环境温度、连续通风条件下，研究废气处理箱内的秸秆介质对尾气中氨的净化效果。

（3）基于内容（1）获得的较优通风速率，研究环境温度（15 ~ 30℃ 和 −25 ~ 0℃）对堆肥温升及堆肥效果的影响，分别记为 B1 和 B2。

（4）基于内容（1）获得的较优通风速率，在环境温度 −25 ~ 0℃ 下，探索堆肥中后期适配的通风速率及通风方式（通风速率 5、15 L/（m^3·min）下的连续通风，最优通风速率下每通风 10 min 停止 40 min 的间歇通风，最优通风速率、氧浓度 14% ~ 17% 调控下的动态通风），分别记为 C1、C2、C3 和 C4，研究两阶段通风优化对低温环境下堆肥效果的影响。

2.3　指标测定与数据分析方法

温度和氧浓度分别采用微敏温度传感器和电化学氧化锆传感器动态监测。总碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定。总氮含量采用 K9860 型全自动凯氏定氮仪测定。有机质含量采用 SX − 10 型马弗炉通过灼烧法测定。pH 值采用 pHS − 4F 型 pH 计测定。种子发芽指数（Germination index，GI）参照国标 NY/T 525—2021 标准方法测定[22]。试验结果为 3 次重复平行试验平均值，采用 Excel 2021 和 SPSS 25.0 软件进行数据处理和显著性分析，利用 OriginPro 2021 软件绘图。

3　结果与分析

3.1　通风速率对好氧堆肥的影响

3.1.1　堆肥温度和氧浓度

当环境温度为 0 ~ 15℃ 时，通风速率对好氧堆肥温升及尾气氧浓度的影响如图 3 所示。

由图 3a 可知，好氧堆肥期间室外环境气温为 0 ~ 15℃、昼夜温差为 5.9 ~ 11.4℃ 时，堆肥舱内温度波动规律与室外气温相似；虽然夜间气温降低和第 9、17 天的阴雨导致堆肥舱内温度明显降低，但堆肥舱温度与室外气温相比仍能得到极显著提升（$P < 0.01$），且昼夜温差也能得到显著降低（$P < 0.05$）。堆肥舱白天、夜间平均温度分别为 27.0、21.5℃，最高温度分别达 32.4、27.9℃，最低温度分别为 20.2、15.7℃，昼夜温差范围为 4.0 ~ 7.5℃。不同通风速率下，A1、A2、A3、A4 和 A5 各组堆体温度变化规律基本一致，均呈先快速上升后下降，然后逐渐趋于稳定的趋势，各组分别在第 6、5、5、4、5 天达到最高温度，为 53.7、53.1、56.4、56.7、57.1℃，且 50℃ 以上分别持续 3.3、4.2、5.7、3.6、3.2 d。因此，尽管通过保温系统提高了通风过程通入堆体的空气温度，但由于通风速率不同导致好氧堆肥过程的最高温度及高温持续时间仍存在显著差异。A4、A5 组通风速率较大，虽然能为堆体提供更多氧气，提高好氧微生物产热能力，但同时也会带走更多热量，反而抑制堆体温升，所以 A4、A5 组在 1 ~ 4 d 期间温升速率低于 A3 组，且高温期过后堆体温度迅速下降，尤其 A5 组从第 10 天开始至堆肥结束均处于较低水平，且在 9 ~ 16 d 期间显著低于其他各组（$P < 0.05$）。A1、A2 组通风速率较小，通入堆体的氧气量较少，但热量损失也较少，所以 A1、A2 组温升速率及达到的最高温度均相对较低，但堆肥中后期的堆体温度却相对较高。由图 3b 可知，好氧堆肥过程中，尾气中氧浓度变化规律相似，且与堆体温度变化相匹配，均呈先降低后上升趋势。A1、A2 组在高温期氧浓度低于 10% 的持续时间分别达 10、5 d，

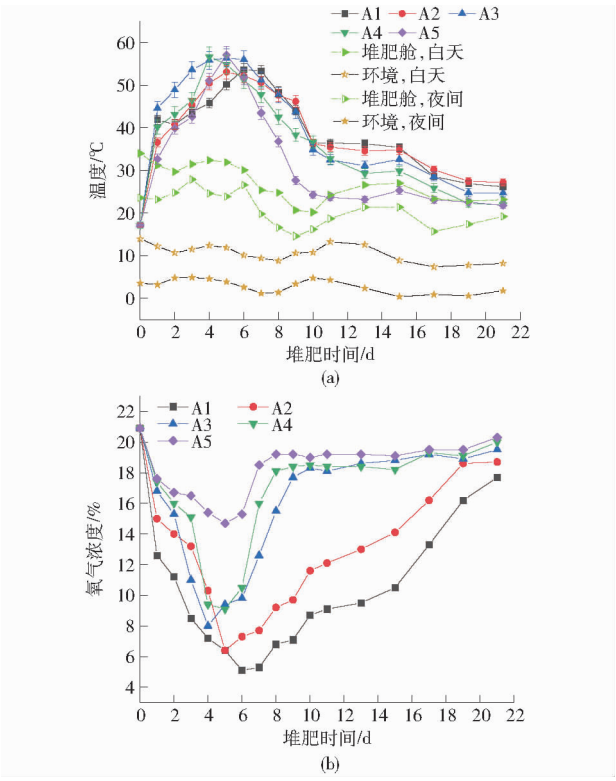


图 3　通风速率对好氧堆肥过程温度及尾气氧气浓度的影响

Fig. 3　Effects of ventilation rates on temperatures and oxygen concentrations in exhaust during aerobic composting

呈供氧不足状态,温升速率相对较低;A3、A4 组仅在高温期 4 ~6 d 期间氧浓度低于 10%,A5 组在整个堆肥期间氧浓度均维持在 15% 以上。因此,A5 组通风速率虽然能为堆肥高温期提供充足氧气,但也造成升温期和腐熟期热量过度损失。HE 等[23]报道,好氧堆肥高温期反应最剧烈,氧气需求量最大,氧浓度可能短暂地低于 10%,该结果与本研究中 A3、A4 组氧浓度变化类似。相比之下,A3 组升温速率最快,高温持续时间更长,说明通风速率 25 L/(m^3·min)更适于堆肥升温。

3.1.2 堆肥有机质含量及 GI

GI 是通过测定植物种子在堆肥浸提液中的发芽情况来评价堆肥腐熟度、量化堆肥毒性或促进作用的有效指标。当环境温度为 0 ~15℃时,通风速率对好氧堆肥有机质含量及 GI 的影响如图 4 所示。

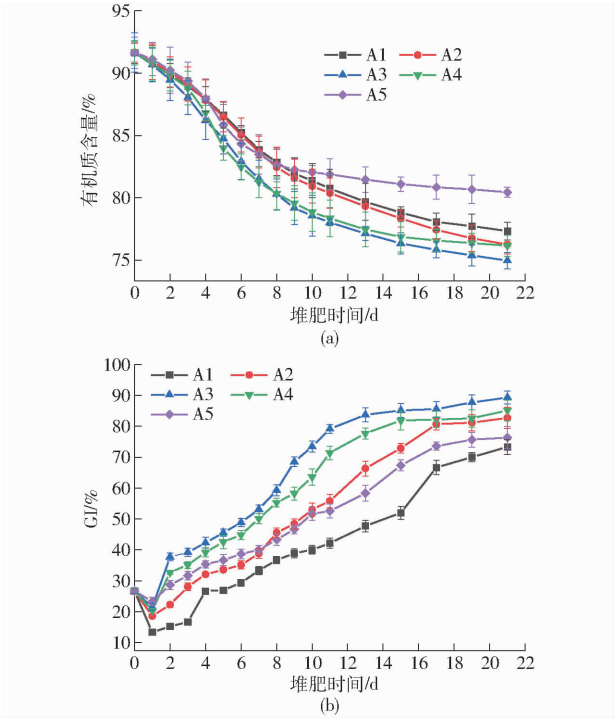


图 4 通风速率对堆肥有机质含量和 GI 的影响

Fig. 4 Effects of ventilation rates on organic matter contents and GI of compost

由图 4a 可知,A1、A2、A3、A4 和 A5 有机质含量均呈持续下降趋势,但下降速率逐渐降低,由初始的 91.65% 降至 21 d 时的 77.33%、76.24%、74.96%、76.15%、80.44%,分别降低 14.32、15.41、16.69、15.50、11.21 个百分点。有机质降解主要发生在前 11 d,分别占整个堆肥过程有机质降解总量的 76.18%、73.19%、81.65%、85.84%、87.15%。在好氧堆肥前期,易分解的有机物含量较高,有机质含量下降速率较快,堆体快速升温,而在堆肥中后期,有机物主要为难分解的木质纤维素,有机质含量下降速率逐渐降低[24]。A3 组的有机质去除最多,其次是 A2、A4 组,而 A5 组最少,该结果与各对应通风速率下的温升规律基本相匹配,即升温速率越快,高温持续时间越长,有机质去除越多。通常 GI 大于 50% 时对植物基本无毒性,大于 80% 时完全无毒性[25]。由图 4b 可知,A1、A2、A3、A4、A5 GI 均在第 1 天时呈略下降趋势,由初始的 26.67% 降至 13.33%、18.58%、21.43%、20.42%、23.30%。这是因为在堆肥初期的升温阶段,好氧微生物活性较高,生长繁殖旺盛,在快速分解有机物的同时也产生有机酸等对植物具有毒害作用的中间产物,抑制种子发芽,导致 GI 略下降。之后,随着堆肥进行,有机物及中间产物持续被微生物分解和利用,pH 值逐渐升高,GI 也随之升高。随着高温期结束,堆肥进入腐熟期,腐殖质逐渐形成,GI 仍持续增加,但随着有机质分解速率降低,GI 增加速率逐渐降低,直至 21 d 时达 73.33%、82.70%、89.29%、85.14%、76.33%。其中 A3 组 GI 最高,其次是 A2、A4 组,均超过 80%,而 A1、A5 组未达到 80%。综上,A3 组通风速率(25 L/(m^3·min))更优。

3.2 秸秆对氨气的减排效果

好氧堆肥通风过程排放的臭气主要为氨气,当环境温度为 0 ~15℃、通风速率为 25 L/(m^3·min)时,废气处理箱内秸秆介质对氨气的减排效果如图 5 所示。

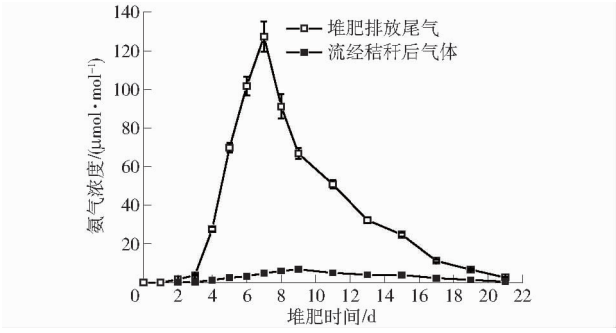


图 5 堆肥排放尾气及流经秸秆介质后气体氨气浓度变化曲线

Fig. 5 Variations in ammonia concentrations in exhaust from composting and gas flowing through straw media

由图 5 可知,好氧堆肥过程尾气中的氨气浓度呈先快速上升后快速下降趋势,说明氨气排放与堆体温度波动密切相关,主要集中在 50℃以上的高温期,3 ~7 d 期间尾气中的氨气浓度达到最高,从 3.8 μmol/mol 上升至 127.3 μmol/mol。秸秆介质对堆肥尾气中的氨气具有较好的吸附作用,在整个堆肥过程中尾气中的氨气浓度降至 0.7 ~6.8 μmol/mol,去除率达 80% ~95%。因此,利用秸秆能显著降低好氧堆肥过程排放的臭气,吸附氨气后的秸秆可作

为原料直接回用于好氧堆肥，对拓宽秸秆在好氧堆肥过程的利用途径及低成本改善堆肥环境具有重要价值。

3.3　环境温度对好氧堆肥的影响

3.3.1　堆肥温度和氧浓度

当通风速率为 25 L/(m³·min)时，环境温度对好氧堆肥温升及氧浓度的影响如图 6 所示。

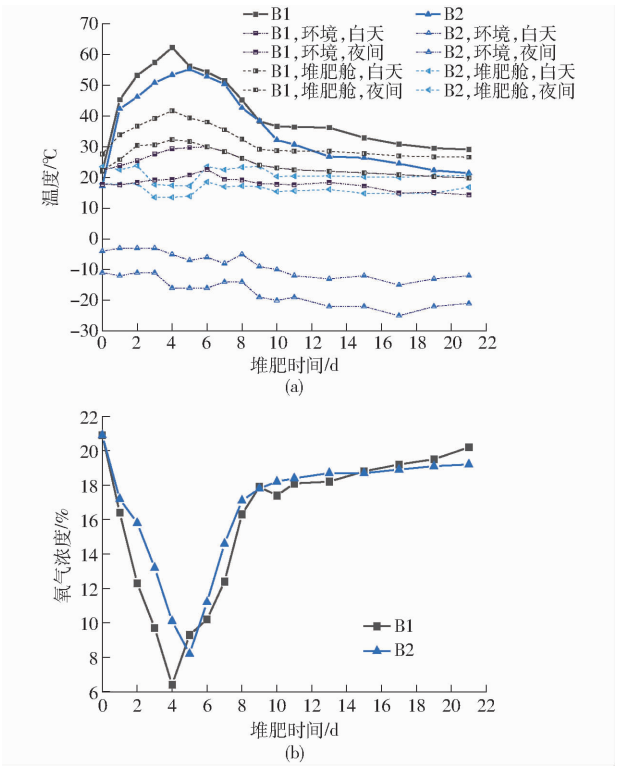


图 6　环境温度对好氧堆肥过程温度和尾气氧气浓度的影响

Fig. 6　Effects of environmental temperatures on temperatures and oxygen concentrations in exhaust during aerobic composting

由图 6a 可知，环境温度 15 ~ 30℃、－25 ~ 0℃的 B1、B2 组堆肥舱内日平均温度分别为 27.1 ~ 32.9℃、16.3 ~ 21.1℃，白天最高温度分别达 45、23.8℃，夜间最低温度分别降至 21.9、13.5℃，说明在实际好氧堆肥过程中，堆肥舱内温度与室外环境相比温度均能得到极显著提升($P < 0.01$)，且在最高、最低环境温度 30、－25℃下，堆肥舱内实际仍可维持在 45℃以下、13.5℃以上，保证好氧堆肥在高温、低温环境下均能稳定运行。B1、B2 组堆体温度变化规律基本一致，但由于环境温度不同仍存在显著差异($P < 0.05$)；B1、B2 组堆体最高温度分别达 62.3、55.2℃，比较 3.1 节中环境温度 0 ~ 15℃而通风速率相同的 A3 组(图 3a)的最高温度分别提高 5.9℃、降低 1.2℃。B1、B2 组 50℃以上高温期分别维持 6.4、5.1 d，较 A3 组分别增加 0.7 d、降低 0.6 d；11 d 后的堆肥中后期，堆体温度仍维持在 29.1 ~ 36.2℃、21.4 ~ 26.8℃。因此，虽然 0℃以下的冬季低温环境导致堆肥温升速率及最高温度均降低，但 50℃以上的高温持续时间也超过 5 d，满足堆肥腐熟的基本要求[3]，进一步证明了该好氧堆肥系统实际可行，适于寒区不同季节的实际需求，保证好氧堆肥的全年稳定运行。由图 6b 可知，B1、B2 组尾气中氧浓度变化规律与 A3 组(图 3b)相似，3 ~ 7 d 期间 50℃以上高温期氧浓度也均低于 10%，维持在 7% ~ 10% 范围，而 7 d 后，氧浓度迅速回升至 18% 并保持基本稳定。尽管随着环境温度的降低，微生物活性随之下降，导致氧气消耗量随之减少，但 A3、B1、B2 组间差异不显著。

3.3.2　堆肥有机质含量和 GI

环境温度对好氧堆肥有机质含量及 GI 的影响如图 7 所示。

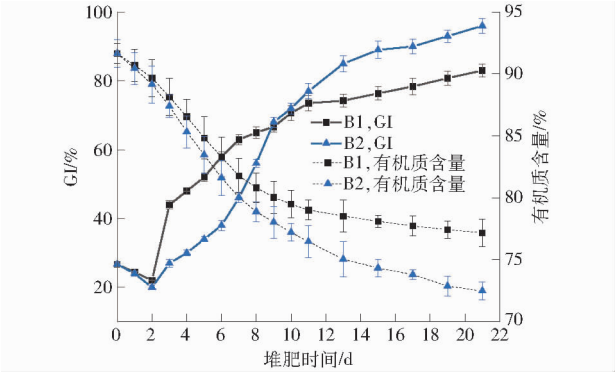


图 7　环境温度对堆肥有机质含量和 GI 的影响

Fig. 7　Effects of environmental temperatures on organic matter contents and GI of compost

由图 7 可知，B1、B2 组有机质含量由初始的 91.65% 分别降至 21 d 时的 72.49%、77.18%，比较 A3 组(图 4a)分别降低 2.47 个百分点、提高 2.22 个百分点。堆肥前 11 d，B1、B2 组有机质含量分别降低 15.18、9.77 个百分点，分别占整个好氧堆肥过程有机质降低总量的 87.36% 和 79.22%，比较 A3 组分别提高 5.71 个百分点、降低 2.43 个百分点，说明环境温度降低在一定程度上降低了有机物分解速率，但有机质的去除均主要发生在堆肥升温期和高温期。B1 和 B2 组 GI 变化规律与 A3 组(图 4b)相似，均在堆肥初期呈略降低趋势，之后 GI 持续上升，至堆肥结束时分别达 96.08%、83.03%，较 A3 组分别提高 6.79 个百分比、降低 6.26 个百分比，进一步说明在不同环境温度下均可达到堆肥的无害化要求[22]。

基于不同环境温度下 A3、B1、B2 组好氧堆肥过程温升及堆肥效果的比较可得，好氧堆肥前 11 d，各组升温速率、最高温度及高温持续时间差异并不显著，但 11 d 后各组堆体温度随环境温度升高或降低差异显著($P < 0.05$)，导致堆肥结束时有机质含量及 GI

显著提高或降低($P<0.05$),说明 25 L/(m^3·min)的持续通风能满足不同环境温度下堆肥前期的温升及高温的维持,但由于环境温度降低导致的通风温度降低仍对堆肥中后期产生较大冲击,抑制堆肥中后期仍在进行生命活动的微生物活性。因此,好氧堆肥 11 d 后的通风仍可进一步优化。

3.4 两阶段通风优化对好氧堆肥的影响

基于 3.1、3.3 节结果,在环境温度 -25 ~ 0℃时,优化好氧堆肥中后期,即 11 d 后的通风策略,探索降低持续通风时的通风速率及间歇通风、动态通风不同通风方式对好氧堆肥的影响,进一步提高好氧堆肥效果及对低温环境的适应性。

3.4.1 堆肥温度和氧浓度

当环境温度为 -25 ~ 0℃时,通风优化对好氧堆肥温升及氧浓度的影响如图 8 所示。

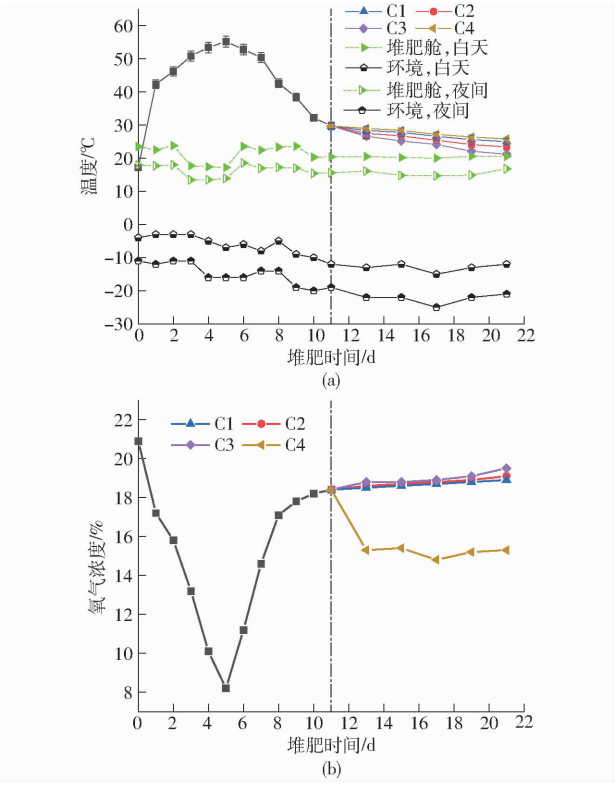


图 8 通风优化对好氧堆肥过程温度和氧气浓度的影响

Fig. 8 Effects of ventilation optimization on temperatures and oxygen concentrations during aerobic composting

由图 8a 可知,好氧堆肥 11 d 后,动态通风下 C4 组堆体温度下降速率最慢,其次为 C1、C2 组,C3 组下降最快。21 d 堆肥结束时,C1、C2、C3、C4 组堆体温度分别从第 11 天的 29.7℃降至 25.0、23.4、21.6、25.8℃,均高于 B2 组的 21.4℃(图 6a),说明在 0℃以下的低温环境,改变堆肥中后期的通风速率和通风方式对提高堆体温度均具有积极作用。5、15 L/(m^3·min)持续通风下的 C1、C2 组温度较 B2 组(25 L/(m^3·min))虽然有所提升,但并不显著。对于通风速率 25 L/(m^3·min)下每通风 10 min 停止 40 min 间歇通风的 C3 组温度高于 B2 组,说明间歇通风能有效降低通风过程产生的热损失,但并不显著且仍低于 C1、C2 组。因此,间歇通风方式下,通风速率 25 L/(m^3·min)仍较高,微生物产热仍不足以弥补通风过程热损失。动态通风下 C4 组堆体温度最高,显著高于 C3、B2 组($P<0.05$),说明动态通风能更有效地降低通风过程热损失,更适于维持寒区冬季低温环境下堆肥中后期堆体温度。由图 8b 可知,好氧堆肥第 11 天时氧浓度为 18.4%,之后 C1、C2、C3 组氧浓度均呈上升趋势,C3 组最高,其次为 C2,C1 最低,但各组间的差异及较 B2 组均不显著;C4 组氧浓度在 2 d 内降至 14% ~17%并保持稳定。

3.4.2 堆肥有机质含量和 GI

当环境温度为 -25 ~ 0℃时,通风优化对堆肥有机质含量及 GI 的影响如图 9 所示。

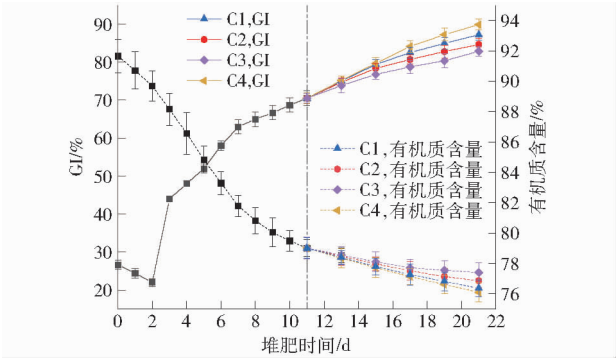


图 9 通风优化对有机质含量和 GI 的影响

Fig. 9 Effects of ventilation optimization on organic matter contents and GI during aerobic composting

由图 9 可知,C1、C2、C3、C4 组有机质含量从堆肥第 11 天的 79.01% 降至第 21 天的 76.36%、77.86%、77.40%、76.10%,说明动态通风更有助于堆肥中后期有机质分解,但较 B2 组仍差异不显著。C1、C2、C3、C4 组 GI 从堆肥第 11 天的 70.51% 上升至第 21 天的 87.21%、84.65%、82.86%、89.89%。ZHANG 等[26]在环境温度 9.5 ~ 15℃时研究鸡粪和玉米秸秆好氧堆肥得到,无通风仅翻堆条件下,堆肥 30 d GI 最大值为 87.6%,低于本研究 21 d 时 C4 组的 GI。因此,增设通风系统并优化通风速率及通风方式能显著改善好氧堆肥温升及保持温度,有效提高好氧堆肥效果。

综上,联合太阳能蓄热增温、双舱室和蓄热水箱保温及两阶段通风优化能显著提升好氧堆肥过程的温度及堆肥效果,保证环境温度 -25 ~ 0℃时的稳定运行并获得良好的堆肥品质。此外,通风系统用电完全由太阳能供电系统提供,整个堆肥运行过程未产生用电成本,实现冬季室外的低成本稳定运行,对

寒区农村户用好氧堆肥技术推广及全年高效连续运转具有重要意义。

4　结论

（1）联合太阳能蓄热增温、双舱室和蓄热水箱保温设计的寒区农村户用好氧堆肥系统实际可行，不仅能实现堆肥舱室温度的有效维持，也可实现通风空气预热，当环境温度为 15 ~ 30℃、0 ~ 15℃、－25 ~ 0℃时，堆肥舱室温度分别达 21.9 ~ 45℃、15.7 ~ 32.4℃、13.5 ~ 23.8℃，适于寒区多种有机废弃物好氧堆肥不同季节的需求，并获得良好的温升及堆肥效果。

（2）两阶段通风优化有助于好氧堆肥前期温度提升及中后期温度维持，堆肥前 11 d，通风速率 25 L/（m^3·min）时连续通风最优，环境温度 15 ~ 30℃、0 ~ 15℃、－25 ~ 0℃时堆体最高温度分别达 62.3、56.4、55.2℃；11 d 后，通风速率 25 L/（m^3·min）、氧气浓度 14% ~ 17% 调控下动态通风更有利于－25 ~ 0℃的低温环境，堆肥 21 d 时 GI 达 89.89%，且好氧堆肥过程未产生用电成本，可实现寒区冬季的低成本高效运行。

（3）秸秆对堆肥尾气中的氨气具有良好的净化效果，显著降低堆肥臭气排放，当环境温度为 0 ~ 15℃时，可将堆肥尾气中的氨气浓度降至 0.7 ~ 6.8 μmol/mol，去除率达 80% ~ 95%，对低成本改善堆肥环境具有重要价值。

参　考　文　献

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023.

[2] 王维，熊锦. 我国农村生活垃圾治理研究综述及展望[J]. 生态经济，2020，36(11)：195－201.
WANG Wei, XIONG Jin. Current research and prospect on rural household trash management in China[J]. Ecological Economy, 2020, 36(11): 195－201. (in Chinese)

[3] 王丽丽，许雷，姚纪宇，等. 堆肥废气余热回用对寒区好氧堆肥的影响[J]. 农业工程学报，2022，38(7)：237－244.
WANG Lili, XU Lei, YAO Jiyu, et al. Effects of preheating ventilation air using exhaust gas on aerobic composting in cold regions[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 237－244. (in Chinese)

[4] 马双双，孙晓曦，韩鲁佳，等. 功能膜覆盖好氧堆肥过程氨气减排性能研究[J]. 农业机械学报，2017，48(11)：344－349.
MA Shuangshuang, SUN Xiaoxi, HAN Lujia, et al. Reduction of ammonia emission during membrane-covered aerobic composting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 344－349. (in Chinese)

[5] 于淼，周海宾，丁京涛，等. 农村庭院厨余垃圾好氧发酵设备设计与试验[J]. 农业工程学报，2024，40(18)：220－227.
YU Miao, ZHOU Haibin, DING Jingtao, et al. Aerobic fermentation equipment for kitchen wastes in rural courtyard[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(18): 220－227 (in Chinese)

[6] JIANG Y F, LI X S, YAO J, et al. Design and performance simulation of a distributed aerobic composting system assisted by solar PV/T heat pump[J]. Renewable Energy, 2022, 196: 547－559.

[7] ZITTEL R, SILVA D, DOMINGUES E, et al. Treatment of smuggled cigarette tobacco by composting process in facultative reactors[J]. Waste Management, 2018, 71: 115－121.

[8] 李骅，朱振明，王居飞，等. 滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：395－404.
LI Hua, ZHU Zhenming, WANG Jufei, et al. Design and test of aeration and mixing system for rotary composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 395－404. (in Chinese)

[9] ZENG J F, SHEN X L, YIN H J, et al. Oxygen dynamics, organic matter degradation and main gas emissions during pig manure composting: effect of intermittent aeration[J]. Bioresource Technology, 2022, 361: 127697.

[10] JIANG T, LI G X, TANG Q, et al. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 31: 124－132.

[11] 陈同斌，郑玉琪，高定，等. 猪粪好氧堆制不同阶段氧气含量变化特征[J]. 应用生态学报，2004，15(11)：2179－2183.
CHEN Tongbin, ZHENG Yuqi, GAO Ding, et al. Variation of oxygen concentration during aerobic composting of pig manure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2179－2183. (in Chinese)

[12] 冯琪，李培伦，刘淑军. 不同月份及不同安装角度时平板太阳能集热器接收的太阳辐照量分析[J]. 太阳能，2021(3)：63－67.
FENG Qi, LI Peilun, LIU Shujun. Analysis of solar irradiation received by flat platesolar collector in different months and at different installation angles[J]. Solar Energy, 2021(3): 63－67. (in Chinese)

[13] 岑幻霞. 太阳能热利用[M]. 北京：清华大学出版社，1997.

[14] UMBERTO B. The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials[J]. Energy, 2019, 182: 777－794.

[15] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京：高等教育出版社，2019.

[16] WANG Y M, TANG Y T, LI M Y, et al. Aeration rate improves the compost quality of food waste and promotes the decomposition of toxic materials in leachate by changing the bacterial community[J]. Bioresource Technology, 2021, 340: 125716.

[17] WANG Y, XU P, WANG Y, et al. Effects of aeration modes and rates on nitrogen conversion and bacterial community in composting of dehydrated sludge and corn straw[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1372568.

[18] WANG L L, FENG Z K, WANG Z J, et al. Aerobic composting characteristics of corn straw and pig manure under dynamic

aeration[J]. Environment Technology, 2024, 46(3): 443 – 452.
[19] 黄金枝, 胡桂萍, 俞燕芳,等. 微生物在农业废弃物堆肥应用中的研究进展[J]. 广东农业科学,2019,46(1):64 – 70.
HUANG Jinzhi, HU Guiping, YU Yanfang, et al. Research progress of microbe in agricultural waste composting[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(1): 64 – 70. (in Chinese)
[20] 聂永丰. 三废处理技术工程手册[M]. 5 版. 北京:化学工业出版社, 2000.
[21] PUYUELO B, GEA T, SÁNCHEZ A. A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 165(1): 161 – 169.
[22] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料:NY/T 525—2021[S]. 北京:中国农业出版社,2021.
[23] HE X Q, HAN L J, GE J Y, et al. Modelling for reactor-style aerobic composting based on coupling theory of mass-heat-momentum transport and contois equation[J]. Bioresource Technology, 2018, 253: 165 – 174.
[24] 戴启鹏,向明灯,常兆峰,等. 农林废物对畜粪堆肥有机质转化和酶活性的影响[J]. 环境工程技术学报,2024,14(5):1541 – 1549.
DAI Qipeng, XIANG Mingdeng, CHANG Zhaofeng, et al. Effects of agricultural and forestry wastes on organic matter conversion and enzyme activity in livestock manure composting[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(5): 1541 – 1549. (in Chinese)
[25] 王丽丽,孙东升,许雷,等. 秸秆过滤猪场废水及滤料与猪粪好氧堆肥研究[J]. 农业工程学报,2022,38(19):180 – 189.
WANG Lili, SUN Dongsheng, XU Lei, et al. Straw filtering wastewater and aerobic composting of filter residues and manure on a pig farm[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 180 – 189. (in Chinese)
[26] ZHANG W M, YU C X, WANG X J, et al. Increased abundance of nitrogen transforming bacteria by higher C/N ratio reduces the total losses of N and C in chicken manure and corn stover mix composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 297: 122410.

(上接第 233 页)

[15] WEN C,HE W,WU W, et al. Recognition of mulberry leaf diseases based on multi-scale residual network fusion SENet[J]. Plos ONE,2024,19(2):e0298700.
[16] 鲁林. 基于深度学习的桑叶病害识别研究[D]. 南充:西华师范大学,2023.
LU Lin. Research on mulberry leaf disease identification based on deep learning[D]. Nanchong: Xihua Normal University, 2023. (in Chinese)
[17] SALAM A, NAZININE M, JAHAN N, et al. Mulberry leaf disease detection using CNN-based smart android application[J]. IEEE Access, 2024, 12: 83575 – 83588.
[18] 罗斌,李家超,周亚男,等. 基于改进 YOLO v8 的轻量化稻瘟病孢子检测方法[J]. 农业机械学报,2024,55(11):32 – 38.
LUO Bin, LI Jiachao, ZHOU Ya'nan, et al. Lightweight rice blast spores detection method based on improved YOLO v8[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):32 – 38. (in Chinese)
[19] 姚百蔚,邵佳慧,徐英杰,等. 基于改进 YOLO v9 的番茄病害检测[J]. 计算机技术与发展,2025,35(6):56 – 61.
YAO Baiwei, SHAO Jiahui, XU Yingjie, et al. Tomato disease detection based on an improved YOLO v9[J]. Computer Technology and Development, 2025, 35(6): 56 – 61. (in Chinese)
[20] LIU W,WANG S,GAO X, et al. A tomato recognition and rapid sorting system based on improved YOLO v10[J]. Machines, 2024,12(10):689.
[21] 王泰华,郭亚州,张家乐,等. 基于改进 YOLO v5s 的水稻害虫识别研究[J]. 农业机械学报,2024,55(11):39 – 48.
WANG Taihua, GUO Yazhou, ZHANG Jiale, et al. Rice pest identification based on improved YOLO v5s[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):39 – 48. (in Chinese)
[22] WANG Z,SU Y,KANG F, et al. PC – YOLO 11s: a lightweight and effective feature extraction method for small target image detection[J]. Sensors,2025,25(2):348.
[23] MD N, H E M C,ABDUS S, et al. Explainable deep learning model for automatic mulberry leaf disease classification[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:1175515.
[24] LI Y,LI X,DAI Y, et al. LSKNet: a foundation lightweight backbone for remote sensing[J]. International Journal of Computer Vision,2024,133(3):1 – 22.
[25] 张志玮,叶曦,杨志红. 基于曼哈顿距离自注意力机制的 U – Net3 + 图像分割[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2024,52(2):56 – 67.
ZHANG Zhiwei, YE Xi, YANG Zhihong. U – Net3 + image segmentation based on a Manhattan distance self-attention mechanism[J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2024, 52(2): 56 – 67. (in Chinese)
[26] ZAMIR S W, ARORA A, KHAN S, et al. Restormer: efficient transformer for high-resolution image restoration[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022: 5728 – 5739.
[27] ZHAO Y, LV W, XU S, et al. Detrs beat yolos on real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2024: 16965 – 16974.
[28] HUANG S, LU Z, CUN X, et al. Deim: Detr with improved matching for fast convergence[C]// Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference, 2025: 15162 – 15171.