

风管加设导流板对牛粪堆肥效果和微生物群落的影响

石 博^{1,2,3}, 程琼仪^{2,3*}, 沈玉君^{1,2,3*}, 张冬丽^{2,3}, 丁京涛^{2,3}, 周海宾^{2,3},
程红胜^{2,3}, 王 越^{2,3}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 农业农村部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 北京 100125;
3. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100125)

摘 要: 通风是影响堆肥效果的重要因素, 通风小孔出流速度及方向由管内流速和静压产生的流速共同决定。由于近进风口处管内流速相对较高, 小孔出风气流方向向风管轴线偏斜, 近进风口区域物料存在通风弱区。为避免该区域通风量不足影响堆肥效果, 该研究在风管首个出风小孔后端 (以进风气流方向计) 加设导流板 (0.75、1、1.25 cm), 基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法确定导流板高度, 并设置 2 组试验, 以加设导流板为处理组 (T), 无导流板为对照组 (CK), 探究导流板对牛粪堆肥效果和微生物群落的影响。研究表明, 导流板可显著降低近进风口处通风弱区, 且板高度显著影响均匀性, 高度为 0.75、1、1.25 cm 时气流平均速度分别提高 10.8%、34.0%、34.2%。处理组 (T) 与对照组 (CK) 相比, 处理组物料高温期温度提升 2.1 °C, 堆肥结束时含水率降低 5.5%, 挥发性固体含量降低 2.4%, 种子发芽指数提高 20.9%。高通量测序结果表明, 增设导流板可显著提高微生物群落的多样性与丰富度, 特别是高温阶段高温双歧菌属 (*Thermobifida*) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 以及降温与腐熟阶段糖单胞菌属 (*Saccharomonospora*) 和副土地杆菌属 (*Parapedobacter*) 的相对丰度。通过冗余分析表明, *Thermobifida*、*Bacillus* 与温度呈正相关, 与 C/N 呈负相关, *Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 与 Germination Index 呈正相关, 与 Volatile Solids Content 呈负相关, 表明风管加设导流板可促进物料有机质降解, 提高腐熟效果。该研究可为堆肥风管设计提供技术支持。

关键词: 牛粪; 堆肥; 导流板; 风管; 微生物群落

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411193

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-12-0240-10

石博, 程琼仪, 沈玉君, 等. 风管加设导流板对牛粪堆肥效果和微生物群落的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 240-249. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411193 <http://www.tcsae.org>

SHI Bo, CHENG Qiongyi, SHEN Yujun, et al. Effects of ventilation pipe deflectors on cattle manure composting efficiency and microbial community dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(12): 240-249. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411193 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国畜禽粪污的年产生量约为 30.5 亿 t, 但资源化利用率不到 80%^[1]。加强畜禽粪污资源化利用是亟待解决的问题。堆肥是实现畜禽固体粪污资源化利用的主要方式, 由于堆肥的本质是好氧微生物将有机质转化为稳定腐殖质, 所以通风及氧气的供给是决定堆肥效果的关键因素之一^[2]。

对于通风效果而言, 通风管道设计是决定物料内进风气流分布的关键因素。实际生产中, 多通过在通风管道上等距离开孔实现正压送风。而空气从小孔流出时,

流出方向由管内流速和静压产生的流速共同决定, 管内流速越高, 孔口出流向风管轴线偏斜角度越大^[3]。据 CHENG 等^[4]的研究表明, 当风管直径为 0.013 m, 猪粪堆肥通风量为 32.5 m³/h 时, 以进风气流方向为前端, 首个通风小孔出风气流方向向风管轴线偏斜近 60°, 致使该小孔上方存在通风弱区, 后端物料气流流量是首个小孔上方物料的 2 倍以上。CAO 等^[5]也发现, 通过管道送风的气流出风方向向风管轴线偏斜, 首个小孔偏斜角度近 30°, 且沿气流流动方向偏斜角度逐渐减小, 首个小孔下方区域同样存在通风弱区。

针对以上问题, 现有研究表明, 导流板可有效改善通风弱区。LI 等^[6]研究发现导流板可改变入射角, 降低高速列车上空调机组的高速剪切流速率, 车厢内冷凝空气流量最高增加 72.5%。CHENG 等^[7]研究了导流板对鸡舍通风弱区的改善效果, 发现导流板能够将气流引导至鸡群活动区域, 使该区域平均风速增加了 0.66 m/s。YE 等^[8]发现了导流板可通过改变气流流动方向影响猪舍粪沟的气流交换率, 当角度为 45°时效果最明显, 气流交

收稿日期: 2024-11-23 修订日期: 2025-04-26

基金项目: 农业农村部规划设计研究院自主研发项目: 基于 CFD 的堆肥氧浓度场模型构建及应用研究 (QD202417)

作者简介: 石博, 研究方向为农业农村废弃物资源化利用。

Email: 2957933301@qq.com

※通信作者: 程琼仪, 博士, 高级工程师, 研究方向为农业农村废弃物资源化利用。Email: qiongyicheng@cau.edu.cn; 沈玉君, 博士, 正高级工程师, 研究方向为农业农村废弃物资源化利用。Email: shenyj09b@163.com

换速率提高 45.6%。FATAHIAN 等^[9]发现，在涡轮机内加装导流板可优化气体射流方向，机器功率最高可提升 166%。程琼仪等^[10]发现了在鸡舍进风口内侧加设导流板后，进风气流路径发生改变，近进风口处通风弱区面积减小，平均气流速度最大增幅为 0.54 m/s。CAO 等^[5]研究导流板对风管定向送风效果影响，发现在出风小孔内侧加装导流板后，奶牛体表可完全被气流覆盖，首个小孔的通风效率提高了 27.5%。但在堆肥通风系统中，导流板对出风气流的改变效果尚未有相关研究。

此外，好氧堆肥的本质是微生物在氧气供给条件下，分解和转化有机物的生物代谢过程。杨萍萍等^[11]发现提高污泥堆肥中厚壁菌门（*Firmicute*）相对丰度，可增加高温期优势菌种比例，使高温期时间延长 2 d。施童等^[12]研究了微生物对餐厨垃圾堆肥的驱动机制，发现提高热杆菌属（*Thermobacillus*）相对丰度可促进木质纤维素分解酶产生，提高有机物降解速率，促进腐殖质形成。席北斗等^[13]发现了放线菌群可提高生活垃圾堆肥降温期和二次发酵温度，使纤维素、半纤维素和木质素降解率分别提高 12.72%、8.95% 和 10.13%。范玉本等^[14]探究了微生物对牛粪堆肥腐熟效果的影响，研究发现在高温期与降温期时厚壁菌门（*Firmicutes*）相对丰度增加，腐熟期时变形菌门（*Proteobacteria*）和放线菌门（*Actinobacteria*）占主导的情况下，微生物群落对有机质分解代谢能力提高，高温期延长了 3 d，微生物群落门水平的相关性提高 56%，促进了物料腐熟进程。

与此同时，计算流体力学方法（computational fluid dynamics, CFD）可清晰反映氧气分布情况，为废弃物处理提供参考。目前 CFD 技术已在废弃物处理通风系统设计中广泛使用。GUO 等^[15]采用 CFD 研究垃圾堆肥填埋场曝气工艺，发现被动曝气可增加 20% 风量，使氨态氮（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）含量下降 96.9%。HUANG 等^[16]基于 CFD-动量传递方程对槽式堆肥过程中气体排放进行研究，发现曝气缓解了物料内厌氧情况，进而影响温度和氧气分布，使 CO_2 排放量提升了 25%。FYTANIDIS 等^[17]建立了 CFD-生化反应耦合模型，基于此模型探究垃圾填埋场曝气系统的通风效果，研究发现模拟结果与可准确地模拟填埋场曝气过程。HE 等^[18]基于 CFD-Contois 耦合方程建立了堆肥温度与氧浓度空间分布模拟模型，研究发现该模型在堆肥物料内气流场研究上具有良好适用性。且 CFD 可克服现场测试测点有限、时间长、前期投入高等问题，其可通过改变几何结构直观探究各导流板高度对近进风口处气流影响及改善情况，从而优化该区域的通风流量，提高堆肥效率。此外，由于反应器堆肥具有占地面积小、自动化程度高、污染气体排放量低等优点，目前已被广泛应用于畜禽粪污处理中^[19]。因此，本研究拟通过 CFD 探究不同高度导流板对气流分布的影响规律。在此基础上，以牛粪和秸秆为原料，基于滚筒反应器探究风管加设导流板对物料堆肥效果和微生物群落的影响，为后续堆肥通风管道设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 现场试验

1.1.1 试验材料

本研究采用的新鲜牛粪取自河北省三河市养殖场，玉米秸秆（粉碎至 1~2 cm）采购于河北省石家庄市。物料配比为牛粪：秸秆=2：1，牛粪好氧堆肥试验的初始理化性质见表 1。

表 1 初始物料的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the initial pile

物料 Material	总碳 Total carbon/%	总氮 Total nitrogen/%	碳氮比 C/N ratio	含水率 Moisture content/%	pH 值 pH value
牛粪 Cow manures	38.70±0.05	2.91±0.05	13.32	84.25±0.03	7.48±0.08
玉米秸秆 Maize stover	39.63±0.02	1.31±0.02	30.33	7.92±0.06	6.52±0.05
混合物料 Mixed pile	39.23±0.06	1.73±0.05	22.74	55.16±1.7	7.28±0.09

1.1.2 试验设备及通风管道导流板设计

本试验在农业农村部规划设计研究院（双桥院区）开展，试验设备为自主研发的滚筒式好氧堆肥反应器（图 1a），反应器长 50 cm、直径 60 cm，左右两侧为可拆卸密封盖，密封盖 1/4 处为气体收集口，上方和下方分别为固体采样口和渗滤液收集口。反应器内铺设主管及 3 支风管，支管呈扇形分布并且可拆卸（图 1b），长度为 415 mm、直径为 12 mm，风管上等距开设小孔，相邻小孔孔距 55 mm、孔径 2 mm。针对近进风口处通风弱区的问题，本研究探究在首个出风小孔后端加设导流板后的改善效果，导流板高度分别为 0.75、1、1.25 cm。

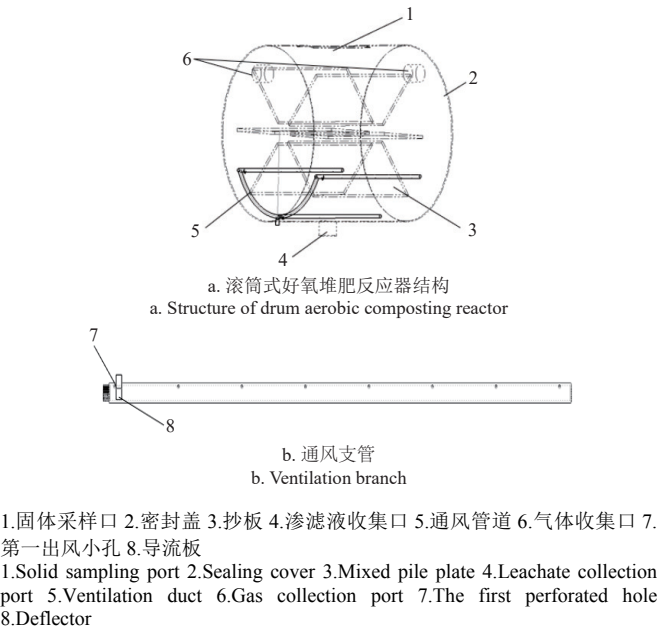


图 1 滚筒式好氧堆肥反应器结构及通风管道结构简化图
Fig.1 Simplified diagram of aerobic composting reactor and ventilation duct

1.1.3 现场试验与样品收集

试验于 2024 年 3 月—5 月进行。本研究设置 2 组试验，以加设导流板为处理组（T），导流板高度基于

1.1.2 的模拟结果, 无导流板为对照组 (CK)。牛粪和秸秆混合均匀后放置于反应器中, 通风频率为 8.5 L/min, 通停比为 1: 2, 即通气 15 min, 停止 30 min。在整个堆肥试验中, 分别于 0、3、7、10、14、21、28 d 采集样品, 且每日上午 9 点和下午 3 点测量温度 2 次。采样点共 18 个, 分别位于距左侧密封盖 3、6 cm, 距滚筒外壳前侧 15、20、25 cm 且距底部 15、20、25 cm。

1.2 CFD 模拟及导流板高度确定

运用 Solidworks 对滚筒反应器进行 1: 1 建模, 并在笛卡尔坐标系中建立滚筒反应器的全尺寸模型, 以反应器的宽作为 x 方向, 取值为 $-0.36 \sim 0.24$ m, 高度为 y 方向, 取值为 $-0.16 \sim 0.44$ m, 长度为 z 方向, 取值为 $-0.25 \sim 0.25$ m。滚筒反应器被划分为 2 个区域, 分别为物料区和通风管道区。网格通过 ICEM 2022R1 划分, 非结构网格离散。采用 3 种水平的非结构网格进行网格独立性检验, 通风管道表面的最大网格, 粗网格设置为 0.3 mm, 中等网格设置为 0.25 mm, 细网格设置为 0.2 mm。物料区域的最大网格, 粗网格设置为 6 mm, 中等网格设置为 5 mm, 细网格设置为 4 mm。将 3 种网格模拟出的平均风速进行对比, 粗网格、中等网格相对于细网格的平均相对差异分别为 9.5%、3.2%。因此模拟采用中等网格。本研究中边界条件为速度入口, 进风速度为 1.25 m/s; 压力出口, 出风压力为 0, 壁面边界条件为无滑移壁面。滚筒反应器内部物料简化为多孔介质, 黏性阻力系数为 $689\ 615.35\text{ m}^{-2}$, 惯性阻力系数为 298.06 m^{-1} [20]。气流与通风管道的摩擦阻力系数为 0.045, 模拟采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 压力和速度以 Coupled 算法耦合, 以二阶迎风格式离散动量、湍动能和湍流耗散量方程[4]。

管道区域分为近进风口区域和剩余区域, 基于式 (1) 连续性方程、动量守恒方程、能量方程的通用方程[21] 和式 (2) 气流均匀性方程[22], 采用 ANSYS FLUENT 软件进行模拟, 并通过软件计算各区域气流均匀性, 确定近进风口处导流板高度。

$$\text{div}(\rho \cdot u \cdot \varphi - I_\varphi \cdot \text{grad}(\varphi)) = S_\varphi \quad (1)$$

$$Cv = \frac{1}{\mu_1} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_1)^2} \quad (2)$$

式中 ρ 为密度, kg/m^3 ; u 为速度矢量, m/s ; φ 表示通用变量, 可以代表速度、温度等; I_φ 表示广义扩散系数; S_φ 表示控制方程的广义源项。对于特定的方程, φ 、 I_φ 和 S_φ 具有特定值。表 2 给出了 3 个符号与特定方程的对应关系, 具体数值见表 2。 n 为样本数量; X_i 为第 i 个测点速度值, m/s ; μ_1 为气流速度平均值, m/s ; Cv 为标准差与平均值的比值。

1.3 指标测试方法

1) 温度: 使用温度计 (型号 TP101, 河北中仪伟创试验仪器有限公司, 中国) 进行测量。

2) 含水率: 将部分新鲜样品装入铝盒放入烘箱 (型号 101-0A, 北京中兴伟业仪器有限公司, 中国), $105\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘干 8 h, 称取前后质量进行计算。

表 2 控制方程中广义源 φ 、 I_φ 和 S_φ
Table 2 Values of general source φ 、 I_φ and S_φ in the control equation

方程 Equation	φ	I_φ	S_φ
连续方程 Continuity equation	1	0	0
动量方程 Momentum equation	u_i	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i}$
能量方程 Energy equation	T	$\frac{k}{c_p}$	S_T
组分方程 Species equation	C_s	$D_s \rho$	0

注: u_i 为 x 、 y 、 z 方向速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为流体黏度系数, $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; p 为压力, Pa ; x_i 为 x 、 y 、 z 方向长度, m ; T 为温度, K ; k 为流体导热系数 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; c_p 为流体比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; S_T 为粘性耗散项, W ; C_s 为组分 s 的浓度, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; D_s 为组分 s 的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

Note: u_i is the velocity component along x 、 y 、 z axis, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ is the viscosity coefficient, $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; p is the pressure, Pa ; x_i is the length along x 、 y 、 z axis, m ; T is the temperature, K ; k is the thermal conductivity, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; c_p is the specific heat capacity, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; S_T is the viscous dissipation term, W ; C_s is the concentration of s , $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; D_s is the diffusion coefficient of s , $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ is the density, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3) pH 值和电导率 (electric conductivity, EC): 将新鲜样品: 去离子水=1: 10 混合, 封口, 摇床震荡 1h, 静置 10 min, 用滤纸过滤, 分别使用 pH 计 (型号 PHS-3C, 上海精科雷磁, 中国) 和电导率仪 (型号 DDS-307A, 上海精科雷磁, 中国) 测定。

4) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量: 采用纳氏试剂显色, 通过紫外分光光度计 (型号 UV8100, 美国 LabTech 公司, 美国) 测量。

5) 挥发性固体含量 (volatile solids content, VS): 测定采用马弗炉灼烧重量法, 使用马弗炉 (型号 SX-G07 102, 天津市中环实验电炉有限公司, 中国) 在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下灼烧 4 h, 称取前后质量进行计算。

6) 种子发芽率指数 (seed germination index, GI): 取浸提液 5 mL 于垫有滤纸的培养皿中, 均匀放进 10 粒种子, 以去离子水作空白对照, 置于 $(25 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 培养箱中培养 48 h, 测量根长及种子发芽率, 种子发芽率 X_{GI} 由式 (3) 确定:

$$X_{GI} = \frac{\text{样品发芽率} \times \text{样品处理的平均根长}}{\text{空白的发芽率} \times \text{空白处理的平均根长}} \times 100\% \quad (3)$$

7) 微生物群落分析: 采用 FastDNA SPIN 试剂盒 (MP Biomedicals, Solon, USA) 提取堆肥样品基因组 DNA, 并进行 PCR 扩增, 采用 Illumina PE2520/300 平台进行 16SrDNA 高通量测序 (上海美吉生物医药科技有限公司)。细菌引物序列为: 上游引物 338F(5'ACTCC TACGGGAGGCAGCAG) 和下游引物 806S(5'GGACTA CHVGGGTWTCTAAT), 测序区域为 16S V3-V4 区域。利用 UPARSE 软件, 依据 0.97 的相似度序列对样本抽平和聚类, 得出 OUT 表后对生物信息进行统计分析。

1.4 数据处理

运用 Fluent 2022R1 软件对不同高度导流板进行模拟与分析; 采用 SPSS 22 软件对好氧堆肥试验数据进行配对 T 检验, 以检验其显著性差异; 堆肥物料腐熟效果分析参照《畜禽粪便堆肥技术规范》(NY/T3442-2019) 标准; 采用 Origin 2021 对理化指标、微生物数据进行图表绘制与冗余分析; 使用美吉生物云平台绘制不同处理的

微生物群落相对丰度。

2 结果与分析

2.1 导流板的高度的选择

基于 CHENG 等^[4]堆肥气流模拟模型，采用 CFD 探究不同高度导流板对物料内气流分布的影响规律。图 2 为通风孔后端无导流板及加设不同高度导流板时， $X=0\text{ m}$ 气流速度分布云图。由图 2a 可以看出，近进风口区域存在通风弱区，这是因为通风小孔出流方向由管内气流及静压产生垂直于管壁速度共同决定，近进风口处管内流速高，导致出流向风管轴线方向偏移的角度较大，使近进风口区域形成通风弱区。由图 2b~2d 可以看出，加设不同高度导流板后通风弱区得到明显改善，这是由于导流板可将出风气流引导至近进风口上方区域；且随着高度增加，导流板将气流引导至进风口处上部物料的效果越明显，该处气流速度增幅越大，这可以归结于随着导流板高度增加，出风气流形成的贴壁射流效果越明显，将出风气流引导至出风口上方的效果越好。

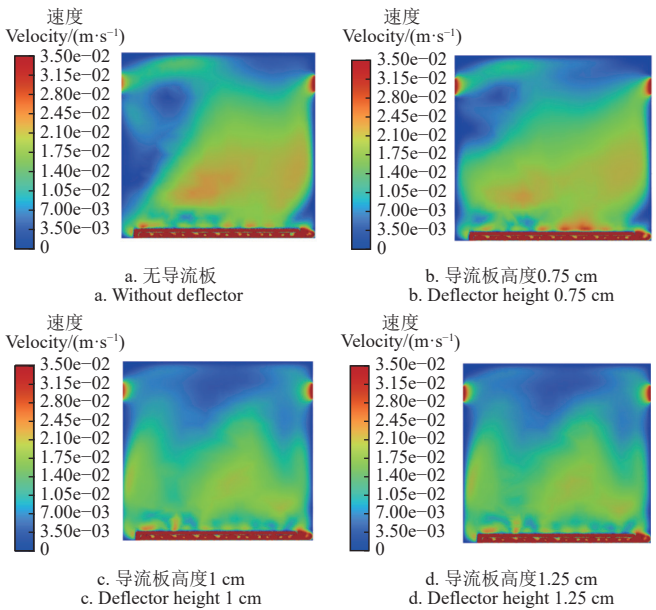


图 2 不同导流板高度情况下截面 $X=0\text{ m}$ 气流速度云图
Fig.2 Airflow velocity contours of $X=0\text{ m}$ with different deflector heights

图 3 为不同导流板高度下 $Z=-0.2\text{ m}$ 气流速度分布云图，由图 3a 可知，物料中心区域存在通风弱区，这主要是由于进风气流向风管轴线方向偏移导致的，加设 0.75 cm 导流板可一定程度提高物料内气流速度，但部分区域仍存在通风弱区（图 3b），加设 1 cm 及 1.5 cm 导流板后通风弱区问题明显改善，物料中间区域气流速度显著增加（图 3c~d），这主要是由于导流板改变了进风方向，向风管轴线方向倾斜的气流在导流板作用下，形成贴壁射流，出风方向偏向于出风口上方。相较于无导流板，导流板高度为 0.75 、 1 、 1.25 cm 时，气流平均速度分别提高 10.8 、 34 、 34.2% 。

风速变异系数（coefficient of air speed variation,

CASV）是评价气流分布均匀性主要指标之一，为各截面速度标准差与平均值之比，变异系数越小，表明气流分布越为均匀^[23]。为探究近进风口区域气流分布均匀性，本研究取 $Z=-0.225$ 、 0 、 0.225 m ，3 个截面 CASV 进行平均（表 3）。不同情况下风速变异系数分别为 1.89 （无导流板）， 1.83 （ $h=0.75\text{ cm}$ ）， 1.67 （ $h=1\text{ cm}$ ）， 1.64 （ $h=1.25\text{ cm}$ ）。结果表明，与无导流板相比，导流板高度为 0.75 、 1 、 1.25 cm 时近进风口上方物料内气流分布均匀性均得到明显改善，分别提高了 3.2% ， 12.1% ， 13.2% 。因此，导流板可改善近进风口上方物料内通风弱区，促进了气流流量的提升，且气流分布均匀性的改善效果随着导流板高度增加而增加，但当导流板高度高于 1 cm 时，均匀性提高的幅度随着高度增加而降低。综上所述，由于导流板高度为 1 、 1.25 cm 时气流平均速度和均匀性提升程度相差较小，且考虑成本及生产过程中使用的便捷性，本研究选取的导流板高度为 1 cm 。

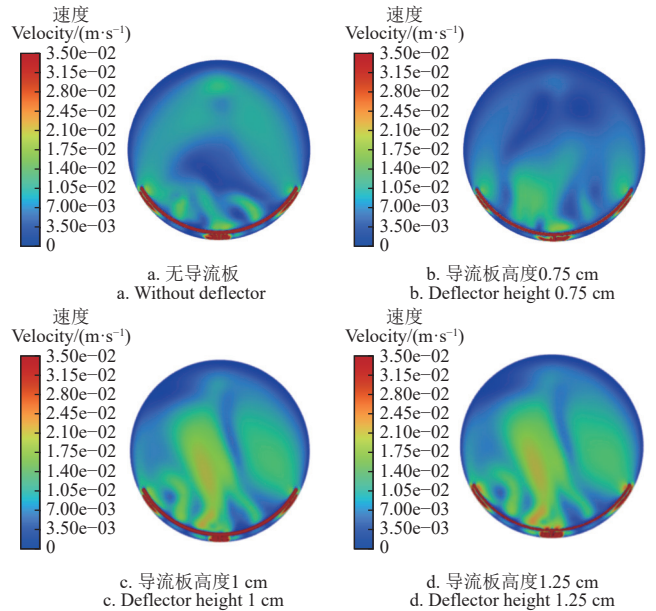


图 3 不同导流板高度下截面 $Z=-0.2\text{ m}$ 气流分布云图
Fig.3 Airflow velocity contours of $Z=-0.2\text{ m}$ with different heights of deflectors

表 3 不同高度下滚筒堆肥反应器各截面的风速变异系数
Table 3 Coefficient of variation of air speed at different heights of drum composting reactor in each section

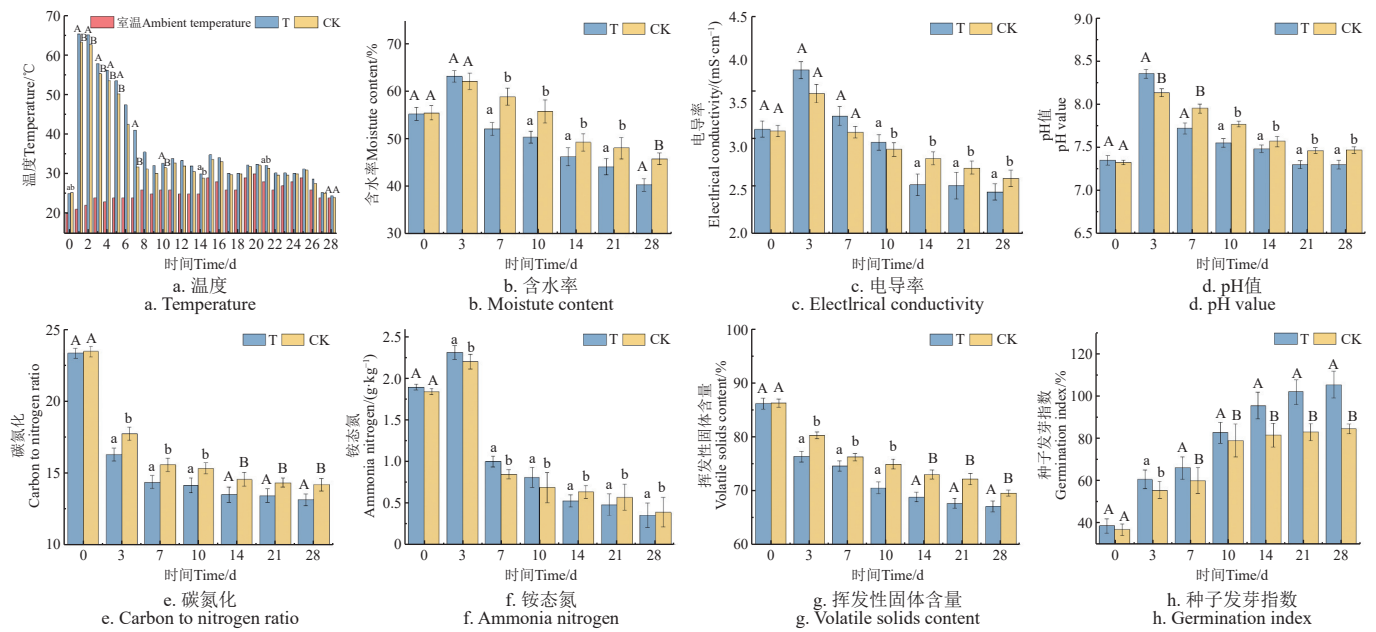
截面 Surface	风速变异系数 Coefficient of air speed variation			
	无导流板 No deflector	0.75 cm	1 cm	1.25 cm
$Z=-0.225\text{ m}$	0.97	0.76	0.65	0.62
$Z=0\text{ m}$	3.45	3.48	3.55	3.56
$Z=0.225\text{ m}$	1.25	1.26	0.79	0.75

2.2 导流板对物料腐熟的影响

温度可直接影响微生物活动强度^[24]。由图 4a 可以看出处理和对照组温度均呈现先升高后减低的趋势，在第 1 天达到峰值，分别为 65.37 、 $63.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，处理组相较于对照组最高温度提高了 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。处理组和对照组高温期超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间均维持了 5 d ，可有效杀死病原体^[25]。处理组平均温度高于对照组，前 10 d 内，温差可达 $3.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

这可能是因为加设导流板后近进风区域通风流量增加,

提升了好氧反应速率。



注: 不同小写字母表示处理组和对照组差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示处理组和对照组差异极显著 ($P < 0.01$), T 代表处理组, CK 代表对照组。
Note: There are significant difference between treatment and control group with different lowercase ($P < 0.05$), and remarkable difference with different uppercase ($P < 0.01$), T represents the treatment group and CK represents the control group.

图 4 好氧发酵过程中理化指标变化

Fig.4 Changes in physical and chemical indexes during aerobic fermentation

含水率 (moisture content) 是影响堆肥过程中传质传热效率的重要指标之一^[26]。由图 4b 可以看出 MC 在堆肥过程中均呈现先上升后下降的趋势, 堆肥初期处理组和对照组的含水率分别由 55.25%、55.48% 上升至 63.19%、62.16%, 这可能由于堆肥初期微生物分解有机物同时产生了水。随着堆肥的进行, 水分含量逐渐呈现下降趋势, 最终降至 40.35%、45.85%, 处理组与对照组的水分含量降低幅度分别为 14.9%、10.63%, 处理组可满足《畜禽粪便堆肥技术规范: NY/T3442-2019》中含水率低于 45% 的要求。在堆肥结束时, 处理相较于对照组的 MC 降低了 5.5%, 表明加设导流板可有效降低近进风口区域堆肥物料的含水率。

电导率 (electrical conductivity) 可以反应堆肥过程中可溶性盐含量, 是衡量物料腐熟度的关键指标之一^[27]。如图 4c 所示, EC 在堆肥过程中总体呈现先升高后下降的趋势, 堆肥初期处理组和对照组的 EC 分别从 3.2、3.18 mS/cm 上升至 3.88、3.61 mS/cm, 这主要与有机物降解产生铵根、硝酸根、磷酸根等离子有关^[28]。处理组和对照组的 EC 在第 3 天后呈现明显下降趋势, 且主要发生在降温期, 这可能是由于微生物作用, 各种离子转化为稳定的腐殖质, 从而导致 EC 下降。处理组和对照组相比, 处理组在堆肥前期的电导率高于对照组, 而后期低于对照组, 这是由于加设导流板促进了近进风口处有机质降解, 从而使离子浓度增高, 后期由于气流速度的增加, 加强了氨的挥发, 使得铵态氮含量降低。堆肥结束时处理与对照组的 EC 分别降低至 2.48、2.63 mS/cm, 均小于 4.0 mS/cm^[29], 符合国家标准。

pH 值是影响微生物活动的重要指标之一^[30]。由

图 4d 可以看出, 堆肥过程中 pH 值呈现先升高后降低趋势, 最终趋于稳定。堆肥初期处理和对照组由于含氮物质的大量分解造成铵态氮积累, 从而导致 pH 值分别从 7.35、7.32 上升至 8.35、8.13。随着堆肥的进行, 在第 7~14 天 pH 值呈现明显下降趋势, 这可能是由降温期内硝化作用增强和 NH_3 挥发共同导致的。处理组和对照组相比, 处理组在高温期的 pH 值高于对照组, 而降温期后低于对照组, 这可能由于加设导流板促进了近进风口区域物料中含氮有机物的分解, 从而使氨态氮的含量增加, 降温期由于气流速度的提高, 导致氨态氮的消耗与 NH_3 的挥发增强。堆肥结束时两组的 pH 值分别为 7.35、7.45, 均维持在 7.5~8 之间, 呈弱碱性, 符合《有机肥料: NY/T525-2021》的腐熟标准。

碳氮比 (C/N) 可以反应堆肥过程中碳和氮的稳定性, 还可作为评估堆肥成熟度的指标^[31]。由图 4e 可以看出两组的 C/N 均呈现下降趋势, 这是由于有机质的矿化作用高于氮素损失速率, 这与 CAO 等^[32]的结果相似。处理和对照组的 C/N 比分别从 23.26、23.37 降低至 13.1、14.15, 变化幅度为 10.16、9.22, 且各组 C/N 的下降主要发生在堆肥前 7 天, 堆肥结束时处理相较于对照组的 C/N 在堆肥结束时降低了 7.4%。表明加设导流板可加速碳的消耗, 减缓氮的消耗。

铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 的变化能够反应堆肥过程中氮素转化的过程^[33]。由图 4f 可以看出, 各组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈现先上升后下降的趋势, 堆肥初期处理和对照组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别从 1.9、1.8 g/kg 升高至 2.3、2.2 g/kg, 这可能由于升温期物料中的有机氮在氨化作用下进行转化, 增加了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生成速率^[33]。随着堆肥的进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 差异

显著 ($P < 0.05$), 最终下降至 0.36、0.39 g/kg, 处理和对照组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 降低幅度分别为 1.5、1.4 g/kg。堆肥结束时处理组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显低于对照组, 其中处理与对照组相比 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量减少了 0.036 g/kg, 表明导流板的增加可以提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化效率。

挥发性固体含量 (volatile solids content, VS) 是反应堆肥过程中有机物降解的重要指标之一^[34]。由图 4 g 可以看出, 各组的 VS 含量均呈下降趋势。堆肥过程中处理和对照组的 VS 分别从 86.24% 和 86.32% 降至 67.14% 和 69.57%, 降幅分别为 19.10%、16.75%, 处理组和对照组在第 0-10 天的降幅明显, 这可能由于高温期氨化作用和矿化作用的增强提高了有机质的降解速率^[34]。堆肥结束时处理相较于对照组降解率提高了 2.4%, 这可能是由于导流板的增加提高了微生物的氧化还原反应以及矿化作用, 加快有机物、糖类、纤维素、半纤维素等物质的降解引起的。

种子发芽指数 (germination index, GI) 综合反应了物料的植物毒性, 是最常用的堆肥腐熟度评价指标之一^[35]。由图 4 h 可以看出 GI 值均呈现上升趋势, 在第 10 天达到 70%, 符合《有机肥料: NY/T525-2021》的腐熟标准。处理和对照组的 GI 差异极显著 ($P < 0.01$), 分别从 38.56%、36.92% 上升至 105.26%、84.32%, 处理和对照组相比 GI 提高了 20.9%。堆肥过程中, 处理组的 GI 整体略高于对照组, 这是由于导流板改善了近进风口区域通风流量, 促进了堆肥过程中有害物质转化, 提高了物料腐熟效果。

2.3 导流板对微生物群落的影响

2.3.1 微生物群落多样性

如图 5a 所示, 处理组和对照组细菌群落的 Chao1 呈现先下降后上升的趋势, 这与堆肥温度的变化有关, 随着温度上升, 微生物活性受抑制, 物种数量降低, 随着堆肥进行, 温度逐渐降低, 其后微生物适应了环境的改变, 这与葛勉慎等^[36]的研究结果一致。此外, 处理组在高温期的 Chao1 指数低于对照组, 而在降温期与腐熟期高于对照组, 这可能由于加设导流板促进了高温期粗有机质、糖类等水溶性有机物以及蛋白质的分解, 加剧了微生物之间的竞争, 随着堆肥的进行, 微生物适应环境的能力提高^[34]。图 5b 为 Shannon 指数变化趋势, 从图中可知, Shannon 指数在前 10 d 呈现上升趋势, 可能归结于微生物活动加强导致有机物快速转化引起的, 其后开始下降, 这可能由于堆肥腐熟阶段微生物对有机物的分解减弱, 同时经过前期的演替与竞争, 导致部分微生物休眠或死亡, 从而使多样性降低^[37]。同时, 堆肥过程中处理 Shannon 指数高于对照组, 这可能由于加设导流板后, 改善了近进风口处的通风弱区, 使得好氧发酵更为充分, 有利于有机质分解的好氧微生物菌群种类增加, 提高了微生物的多样性。由于 Chao1 指数和 Shannon 指数可分别反映微生物群落的丰富度和多样性^[34], 因此加设导流板可以显著改善微生物群落结构, 提高降温期和腐熟阶段微生物群落的多样性与丰富度。

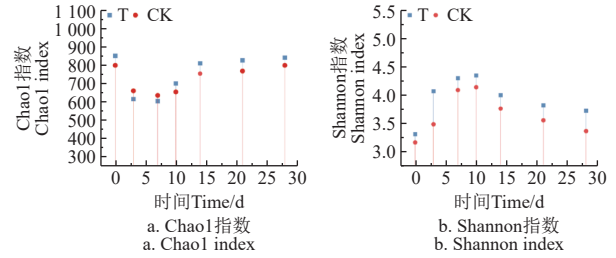


图 5 好氧发酵过程中细菌多样性的变化

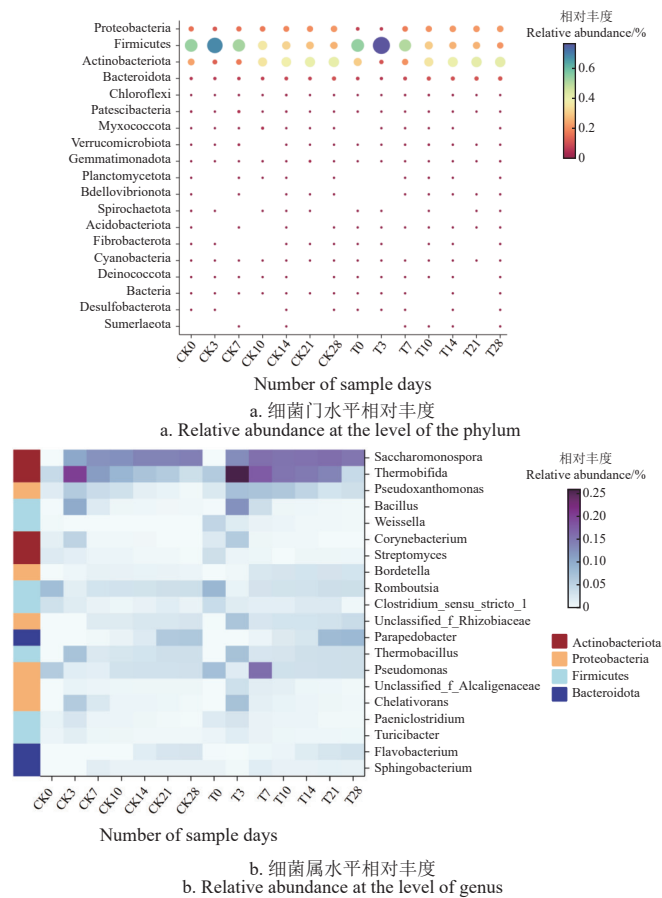
Fig.5 Changes in bacterial diversity during aerobic fermentation

2.3.2 微生物群落结构

微生物群落演替是影响堆肥效果的主要因素之一。图 6a 为细菌在门水平上的相对丰度 (前 20 菌门)。2 个处理的优势菌门为厚壁菌门 (*Firmicutes*)、放线菌门 (*Actinobacteria*) 和变形菌门 (*Proteobacteria*), 其中 *Firmicutes* 占绝对优势, CK 和 T 处理的平均相对丰度分别为 40.6% 和 42.1%。*Firmicutes* 可以促进大分子有机物的降解, 其在升温期和高温期相对丰度逐渐升高, 这可能是由于 *Firmicutes* 适应高温、高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生存环境。此后, *Firmicutes* 的相对丰度逐渐减少, 这主要是由于温度降低后, 嗜温微生物占据主导, 嗜热微生物活性降低。高温期处理组的相对丰度达到 76.7%, 比对照组高 8.4%。*Proteobacteria* 中包括大量碳氮循环代谢菌门, 是降解木质纤维素的主要菌群之一^[38], *Proteobacteria* 在降温期升高, 其后趋于稳定。在第 10 天处理组和对照组相对丰度差异最大, 分别为 20.7% 和 17.1%。*Actinobacteria* 可一定程度表征堆肥的腐熟程度, 是促进腐殖质形成的菌群之一^[39], *Actinobacteria* 在降温期升高, 其后趋于稳定, 这主要由于其能够产生木质纤维素水解酶, 促进了腐殖质的形成。在第 7 天处理组与对照组相对丰度差异最大, 分别为 20.6%、17.3%, 拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 可促进堆肥过程中代谢, 提供物料养分含量, *Bacteroidota* 在降温期升高, 其后趋于稳定, 这可能由于其可利用一系列酶促进复杂的有机物质分解。在第 10 天处理组和对照组相对丰度差异最大, 分别为 9.9% 和 6.9%。

图 6b 是细菌在属水平上的相对丰度 (前 20 菌属)。各组的优势菌属为糖单胞菌属 (*Saccharomonospora*)、高温双歧菌属 (*Thermobifida*)、假黄色单胞菌属 (*Pseudoxanthomonas*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)。堆肥初期, 各组的优势菌属为厚壁菌门 (*Firmicutes*) 中 *Romboutsia*, 作为牛肠道中特有的菌属, 可分解有机物、糖类以及蛋白质等物质。与对照组相比, 处理组 *Romboutsia* 相对丰度高 0.9%。堆肥高温期, 厚壁菌门 (*Firmicutes*) 中芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 与放线菌门 (*Actinobacteria*) 中高温双歧菌属 (*Thermobifida*) 占据优势, 可耐受高温环境, 参与有机生物降解。与对照组相比, 处理组 *Bacillus* 与 *Thermobifida* 相对丰度分别高 2.4%、5.7%, 堆肥降温期与腐熟期, 变形菌门 (*Proteobacteria*) 中假单胞杆菌属 (*Pseudomonas*)、放线菌门 (*Actinobacteria*) 中糖单胞菌属 (*Saccharomonospora*) 以及拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 中副土地杆菌属 (*Parapedobacter*) 占据优

势,可分解纤维素、半纤维素、木质素等物质。处理组与对照组相比,处理组 *Pseudomonas*、*Saccharomonospora* 以及 *Parapedobacter* 相对丰度较高。



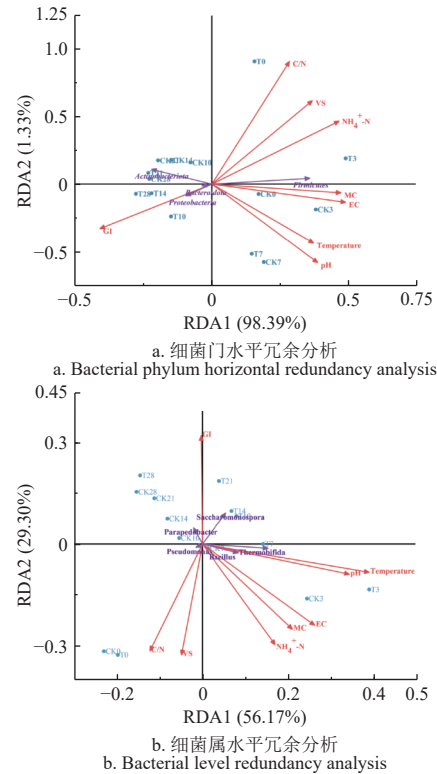
注: T0~T28 分别代表处理组第 0、3、7、10、14、21、28 天样本; CK0~CK28 分别代表对照组第 0、3、7、10、14、21、28 天样本。
Note: T0~T28 represent the samples from the treatment group on days 0, 3, 7, 10, 14, 21, and 28; CK0~CK28 represent the samples from the control group on days 0, 3, 7, 10, 14, 21, and 28.

图 6 堆肥过程中门水平和属水平主要细菌群落的相对丰度
Fig.6 Relative abundance of major bacterial communities at the phylum and genus levels during the composting process

2.3.3 微生物与理化指标的相关性分析

微生物群落结构是影响理化指标的关键因素之一^[40]。本研究通过冗余分析探究了理化指标 (pH 值、EC、MC、VS、GI、C/N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、温度) 与细菌微生物群落间的相关关系,由图 7a 可知,横坐标解释了 98.39%,纵坐标解释了 1.33% 的理化指标和微生物群落的关系。其中,EC 解释了 97.37% 的细菌群落变化,在理化指标中占比最大。*Actinobacteria*、*Proteobacteria*、*Bacteroidota* 与 EC 呈负相关,与 GI 呈现正相关,说明以上微生物促进了堆体腐熟。温度解释了 73.99% 的细菌群落变化,*Firmicutes* 与温度呈现正相关,说明其耐高温,为堆肥过程中有机质分解起到重要作用。*Actinobacteria*、*Proteobacteria*、*Bacteroidota* 与 pH 值呈负相关,说明了 *Actinobacteria*、*Proteobacteria*、*Bacteroidota* 适宜在中性条件下生存,尤其在堆肥初期和腐熟期较为活跃。此外 *Actinobacteria*、*Proteobacteria*、*Bacteroidota* 还与 VS、C/N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈负相关,而与 GI 呈正相关,可以再次说

明 *Actinobacteria*、*Proteobacteria*、*Bacteroidota* 相对丰度越高,可以提高纤维素、半纤维素、木质素等物质的降解,有利于腐殖质生成,促进堆肥腐熟效果,因此加设导流板可通过改变 *Actinobacteria*、*Proteobacteria* 等微生物群落结构影响堆肥效果。



注: T0~T28 分别代表处理组第 0、3、7、10、14、21、28 天样本; CK0~CK28 分别代表对照组第 0、3、7、10、14、21、28 天样本。
Note: T0~T28 represent the samples from the treatment group on days 0, 3, 7, 10, 14, 21, and 28; CK0~CK28 represent the samples from the control group on days 0, 3, 7, 10, 14, 21, and 28.

图 7 门水平与属水平上理化指标与微生物群落的冗余分析
Fig.7 Redundancy analysis of physicochemical indicators and microbial communities at the phylum and genus levels

由图 7b 可知,横坐标解释了 56.17%,纵坐标解释了 29.30% 的理化指标和微生物群落的关系。其中,温度解释了 94.3% 的细菌群落变化,在理化指标中占比最大。高温双歧菌属 (*Thermobifida*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 与温度呈正相关,说明其在高温情况下可促进纤维素等复杂有机物降解。此外糖单胞菌属 (*Saccharomonospora*)、高温双歧菌属 (*Thermobifida*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 还与 pH 值呈正相关,说明 *Thermobifida*、*Bacillus* 适宜在碱性条件下生存,尤其在高温期最为活跃。糖单胞菌属 (*Saccharomonospora*) 和副土地杆菌属 (*Parapedobacter*) 与 GI 呈正相关,与 VS、C/N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈负相关,说明 *Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 相对丰度提升可促进降温期和腐熟期堆肥物料降解,提高堆肥效果。因此加设导流板可通过改变 *Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 等微生物群落结构影响堆肥效果。

3 讨论

导流板可提升近进风口区域的通风流量,提高好氧

微生物菌群相对丰度, 促进堆肥物料腐熟。从微生物门水平看, 升温期 *Firmicutes* 相对丰度提升, 促进速效碳源物质等大分子有机物降解, 剧烈的微生物活动促使堆体温度升高, 此外, 降温期及腐熟期 *Proteobacteria* 的相对丰度提升, 提高了纤维素和木质素等物质降解^[38], 而 *Actinobacteria* 菌门相对丰度增加, 也可促进剩余纤维素、半纤维素、木质素等物质降解^[39]。与此同时, *Bacteroidota* 相对丰度的提升, 加速了堆肥中养分的释放和转化^[12]。从微生物属水平看, 升温期 *Bacillus* 与 *Thermobifida* 菌属的相对丰度提高, 加剧了有机物中碳的消耗和热量释放, 导致 C/N 下降以及堆体温度的升高^[34], 降温期 *Pseudomonas* 菌属作为与氮有关的菌属, 其相对丰度提升, 可促进铵态氮向硝态氮转化的速率和氨气释放^[40]。此外, 腐熟期 *Pseudomonas*、*Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 菌属的丰度提升, 可促进氧化还原反应以及矿化作用, 加快复杂有机物质降解为简单的糖类、氨基酸等小分子物质, 导致 VS 含量降低。同时还可促进有害物质转化和腐殖质的形成, 导致 GI 值升高, 从而满足物料腐熟要求。

本研究基于 CFD 方法改善了管道近进风口区域物料进风气流供给不足的问题, 增设导流板后气流均匀程度提升 10% 左右, 可为反应器堆肥、槽式堆肥、条垛式堆肥等通风管道优化提供技术参考。但出流速度和角度影响射流初始段和主体段长度及射流轴心速率的衰减。管道设计过程中, 建议的管内流速为 2~8 m/s, 鼓风机的风压, 即系统提供的总压为 10~100 kPa, 管内流速和总压的变化使出风速度和方向随之改变。而导流板高度显著影响导流效果, 为保证气流形成完全贴附, 避免在初始段或主体段气流脱落回转, 应保证导流板有足够的高度^[41], 因此可对不同管内流速和总压情况下导流板的高度进行讨论。此外, 不同粪污进行堆肥时所需通风量会随着物料理化性质变化而改变。本研究中选用的堆肥物料为牛粪, 在采用其他畜禽粪污, 如猪粪进行好氧堆肥时, 物料通风量会发生变化, 导流板对通风弱区的影响程度亦随之改变, 所以在物料发生变化时导流板对堆肥的腐熟影响效果需要进一步探究。

除此以外, 当牛粪处理体量由实验室规模扩大到工厂规模时, 需要增加通风量来满足物料好氧发酵需求, 通风量的改变使得管内动压及静压同时发生变化, 因此导流板高度也会随之改变, 导流板对腐熟效果的影响需进一步验证。

4 结 论

1) 通风孔后加设导流板可改善近进风口区域通风弱区。与无导流板相比, 导流板高度为 0.75 cm、1 cm、1.25 cm 时, 气流平均速度分别提高了 10.8%、34.0%、34.2%。考虑使用便捷性, 本研究选取导流板高度为 1 cm。

2) 与无导流板相比, 加设导流板后物料高温期温度提高了 2.1 °C, 堆肥结束时 MC 降低 5.5%, EC 降低至 2.5 mS/cm, C/N 降低 7.4%, pH 降低至 7.35, NH_4^+ -N 降低 0.036 g kg⁻¹, VS 降解率提高 2.4%, GI 提高了 20.9%。

3) 导流板可显著提升高温期细菌属 *Thermobifida*、*Bacillus* 以及降温期与腐熟期细菌属 *Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 的相对丰度, 促进有机质降解。

4) 细菌属 *Thermobifida*、*Bacillus* 与温度呈正相关, 与 C/N 呈负相关, 细菌属 *Saccharomonospora*、*Parapedobacter* 与种子发芽指数呈正相关, 与挥发性固体含量呈负相关, 表明导流板可促进物料有机降解质, 提高堆肥腐熟效果。

[参 考 文 献]

- [1] 周新伟, 吕志伟, 金梅娟, 等. 不同碳氮比牛粪对基质化堆肥中温室气体排放和理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(13): 260-266.
ZHOU Xinwei, LU Zhiwei, JIN Meijuan, et al. Effects of different carbon to nitrogen ratios of cattle manure on greenhouse gas emissions and physicochemical properties during substrate composting[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(13): 260-266. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王友玲, 邱慧珍, 李孟婵, 等. 不同通风方式下牛粪堆肥过程中微生物群落演替及其对环境因子的响应[J]. 环境科学学报, 2023, 43(8): 189-201.
WANG Youling, QIU Huizhen, LI Mengchan, et al. Microbial community succession and response to environmental factors during composting under different ventilation conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(8): 189-201. (in Chinese with English abstract)
- [3] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 第三版. 北京: 中国建设工业出版社, 2009
- [4] CHENG Q, MENG H, ZHOU H, et al. Airflow Field Simulation Model Building and Application for Aerobic Compost Using CFD[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 245-254.
- [5] CAO M, YANG R, CHOI C Y, et al. Effects of discharge angle of jet from a slot orifice on cooling performance for a perforated air ducting system in dairy cattle barn[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107890.
- [6] LI X, WU F, TAO Y, et al. Numerical investigation of flow deflectors for the improvement of condensing air flux through the air-conditioning unit on high-speed trains[J]. Building and Environment, 2022, 215: 108949.
- [7] CHENG Q, LI H, RONG L, et al. Using CFD to assess the influence of ceiling deflector design on airflow distribution in hen house with tunnel ventilation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 165-174.
- [8] YE Z, SAHA C K, LI B, et al. Effect of environmental deflector and curtain on air exchange rate in slurry pit in a model pig house[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(4): 522-533.
- [9] FATAHIAN H, MISHRA R, JACKSON F F, et al. Design optimization of an innovative deflector with bleed jets to enhance the performance of dual Savonius turbines using CFD-Taguchi method[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 296: 117655.
- [10] 程琼仪, 穆钰, 李保明. 进风位置对纵向通风叠层鸡舍气流和温度影响 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 192-199.
CHENG Qiongyi, MU Yu, LI Baoming. CFD simulation of influence of air supply location on airflow and temperature in stacked-cage hen house with tunnel ventilation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(15): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨萍萍, 尹华, 彭辉, 等. 外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3536-3543.
YANG Pingping, YIN Hua, PENG Hui, et al. Effects of exogenous microorganism inoculation on efficiency and

- bacterial community structure of sludge composting[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3536-3543. (in Chinese with English abstract)
- [12] 施童, 陈杰, 元传仁, 等. 农林废弃物对厨余垃圾堆肥腐殖化的影响与微生物驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 191-201.
- SHI Tong, CHEN Jie, QI Chuanren, et al. Effects of agricultural and forestry wastes on humification and its microbially driven mechanisms in kitchen waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(13): 191-201. (in Chinese with English abstract)
- [13] 席北斗, 党秋玲, 魏自民, 等. 生活垃圾微生物强化堆肥对放线菌群落的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊.1): 227-232.
- XI Beidou, DANG Qiuling, WEI Zimin, et al. Effects of microbial inoculants on actinomycetes communities diversity during municipal solid waste composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(增刊.1): 227-232. (in Chinese with English abstract)
- [14] 范玉本, 展恩欣, 李清向, 等. 炭基微生物菌剂促进牛粪好氧堆肥腐熟过程研究[J]. *河北科技大学学报*, 2023, 44(1): 74-82.
- FAN Yuben, ZHAN Enxin, LI Qingxiang, et al. Study on the promotion of composting process of cow dung aerobic composting by biochar-based microbial agents[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2023, 44(1): 74-82. (in Chinese with English abstract)
- [15] GUO S, YU W, ZHAO H, et al. Numerical simulation to optimize passive aeration strategy for semi-aerobic landfill[J]. *Waste Management*, 2023, 171: 676-685.
- [16] HE X, HAN L, HUANG G. Analysis of regulative variables on greenhouse gas emissions and spatial pore gas concentrations with modeling during large-scale trough composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 124066.
- [17] FYTANIDIS D K, VOUDRIAS E A. Numerical simulation of landfill aeration using computational fluid dynamics[J]. *Waste Management*, 2014, 34(4): 804-816.
- [18] HE X, HAN L, GE J, et al. Modelling for reactor-style aerobic composting based on coupling theory of mass-heat-momentum transport and Conotois equation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 253: 165-174.
- [19] 程红胜, 隋斌, 孟海波, 等. 滚筒式沼渣好氧发酵反应器中试装置设计与性能试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 224-231.
- CHENG Hongsheng, SUI Bin, MENG Haibo, et al. Design and performance test of aerobic fermentation rotary reactor pilot plant for biogas residue[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(24): 224-231. (in Chinese with English abstract)
- [20] CHENG Q, SHEN Y, ZHAO S, et al. Study of the variation law of the airflow resistance and related physical parameters of the pile throughout compost process with cattle manure[J]. *Waste Management*, 2024, 174: 263-272.
- [21] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 7-11.
- [22] 程琼仪. 叠层笼养蛋鸡舍夏季通风气流 CFD 模拟与优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- CHENG Qiongyi. The CFD Simulation and improvements of Ventilation in Stacked-cage Laying Hen Housing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [23] CHENG Q, FENG H, MENG H, et al. CFD study of the effect of inlet position and flap on the airflow and temperature in a laying hen house in summer[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 203: 109-123.
- [24] ZHANG Z, YANG H, LINGHU M, et al. Cattle manure composting driven by a microbial agent: A coupled mechanism involving microbial community succession and organic matter conversion[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 952: 175953.
- [25] 易荣菲. 牛粪堆肥中理化性质及酶活性动态变化特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- YI Rongfei. Dynamics of Physicochemical Properties and Enzyme Activities in the Manure Compost Process [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [26] ZHU L, ZHAO Y, CHEN S, et al. Alternating ventilation accelerates the mineralization and humification of food waste by optimizing the temperature-oxygen-moisture distribution in the static composting reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 393: 130050.
- [27] 何莹莹, 闵柏林, 向远昆, 等. 电场辅助对厨余垃圾好氧堆肥的影响机制研究[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(5): 2554-2561.
- HE Yingying, MIN Bailin, XIANG Yuankuan, et al. Effect of electric field assistant on the food waste aerobic composting[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(5): 2554-2561. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵璐, 王佳妮, 殷婕, 等. 不同源生物炭对多元物料协同堆肥腐熟度和腐殖化的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 250-260.
- ZHAO Lu, WANG Jiani, YIN Jie, et al. Effects of biochar from different sources on the maturity and humification during diverse materials synergistic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(4): 250-260. (in Chinese with English abstract)
- [29] SUN S, GUO C, WANG J, et al. Effect of initial moisture content, resulting from different ratios of vegetable waste to maize straw, on compost was mediated by composting temperatures and microbial communities at low temperatures[J]. *Chemosphere*, 2024, 357: 141808.
- [30] GENG X, YANG H, GAO W, et al. Greenhouse gas emission characteristics during kitchen waste composting with biochar and zeolite addition[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 399: 130575.
- [31] SHEN B, ZHENG L, ZHENG X, et al. Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 413: 131416.
- [32] CAO Z, DENG F, WANG R, et al. Bioaugmentation on humification during co-composting of corn straw and biogas slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 374: 128756.
- [33] 李丹, 陈豹, 曹云, 等. 二氧化锰对微好氧堆肥腐熟、温室气体及臭气排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 202-212.
- LI Dan, CHEN Bao, CAO Yun, et al. Effects of manganese dioxide on composting maturity, greenhouse gas and odor emission of multi-organic solid waste micro-aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(13): 202-212. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘娟, 沈玉君, 罗文海, 等. 盐含量对餐厨垃圾好氧堆肥腐殖化过程及微生物演变的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 190-201.
- LIU Juan, SHEN Yujun, LUO Wenhai, et al. Effects of salt content on the humification and microbial community succession of food waste aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(19): 190-201. (in Chinese with English abstract)
- [35] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 177-182.
- HUANG Guangqun, HUANG Jing, ZHANG Yang, et al. Feasibility analysis of rapid prediction of seed germination

- index during digestate aerobic composting[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(5): 177-182. (in Chinese with English abstract)
- [36] 葛勉慎, 周海宾, 沈玉君, 等. 添加剂对牛粪堆肥不同阶段真菌群落演替的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5173-5181.
- GE Mianshen, ZHOU Haibin, SHEN Yujun, et al. Effect of additives on the succession of fungal community in different phases of cattle manure composting[J]. Chinese Environmental Science, 2019, 39(12): 5173-5181. (in Chinese with English abstract)
- [37] 赵阳阳, 刘银双, 牛宏进, 等. 鸡粪好氧堆肥过程中细菌群落结构和功能分析[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 1175-1187.
- ZHAO Yangyang, LIU Yinshuang, et al. The structure and function analysis of bacterial community during aerobic composting of chicken manure[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(3): 1175-1187. (in Chinese with English abstract)
- [38] 尹子铭, 杨燕, 唐若兰, 等. 秸秆对猪粪静态兼性堆肥无害化和腐熟度的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 218-226.
- YIN Ziming, YANG Yan, TANG Ruolan, et al. Effects of maize stover on the harmlessness and maturity during the static facultative composting of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(7): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [39] GUO Y X, CHEN Q J, QIN Y, et al. Succession of the microbial communities and function prediction during short-term peach sawdust-based composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 332: 125079.
- [40] 段曼莉, 徐洪波, 覃振伦, 等. 磁化水复合保氮剂对堆肥过程中氮素损失和微生物群落的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40 (12): 202-212.
- DUAN Manli, XU Hongbo, QIN Zhenlun, et al. Effects of magnetized water combined with nitrogen-preserving agents on nitrogen loss and microbial communities during composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(12): 202-212. (in Chinese with English abstract)
- [41] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 第 5 版. 北京: 中国建设工业出版社, 2009

Effects of ventilation pipe deflectors on cattle manure composting efficiency and microbial community dynamics

SHI Bo^{1,2,3}, CHENG Qiongyi^{2,3*}, SHEN Yujun^{1,2,3*}, ZHANG Dongli^{2,3}, DING Jingtao^{2,3}, ZHOU Haibin^{2,3},
CHENG Hongsheng^{2,3}, WANG Yue^{2,3}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Institute of Energy and Environmental Protection, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Key Laboratory of Technology and Model for Recycling of Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: Ventilation is one of the most critical influencing factors in the homogeneous and efficient decomposition of organic matter during composting. Among them, the supplied air velocity of the perforation holes can dominate the airflow velocity in the pipe and the static pressure perpendicular to the pipe wall. Furthermore, the airflow direction from these perforation holes can often deviate towards the central axis of the pipe, leading to a ventilation-deficient zone in the proximal inlet area. The airflow direction can also be attributed to the relatively higher airflow velocity near the inlet. However, the insufficient ventilation can cause the low efficiency of the composting. In this study, the deflectors (0.75, 1, and 1.25 cm in height) were introduced behind the first perforated hole along the airflow direction. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was employed to optimize the deflector height. A systematic investigation was also made on the impacts on the manure composting efficiency and microbial community dynamics. Results demonstrated that the optimal deflectors effectively mitigated the ventilation-deficient zone near the inlet. The height of the deflectors also dominated the airflow uniformity. Specifically, the deflector with a height of 0.75, 1, and 1.25 cm increased the average airflow velocity by 10.8%, 34%, and 34.2%, respectively, compared with the without deflector. In addition, there was no significant increase in the airflow speed with 1 and 1.25 cm deflectors. Finally, the height of the deflector was selected as 1cm, according to the cost and convenience. Two experiments were conducted to take the deflector-installed (1 cm) ventilation pipe as the treatment group (T), and the pipe without deflectors as the control group (CK). Compared with the CK, the T exhibited a 2.1°C temperature increase during the thermophilic phase. While there was the decrease of 5.5%, 2.35%, 0.15 mS/cm, 1, 0.1, 35.76 mg/kg, 20.94% in the moisture content, the volatile solids (VS), the electrical conductivity (EC), the carbon-nitrogen ratio (C/N), the pH value (pH), the ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), and the germination index (GI) at maturation period, respectively. High-throughput sequencing revealed that the deflector significantly enhanced the diversity of the microbial community. The airflow increased near the inlet, indicating the increase in the Chao 1 and Shannon index. At the level of the microbial phylum, especially during the thermophilic phase, the degradation of the macromolecular organic substances (such as the quick-acting carbon source substances) was promoted to increase the relative abundance of Firmicutes. The degradation of cellulose and lignin was promoted to increase the relative abundance of Actinomycetes and Proteobacteria in the cooling and maturing phases. Redundancy analysis indicated the positive correlations between Firmicutes and Temperature, as well as Actinobacteria/Proteobacteria/Bacteroidota and GI. While there was a negative correlation with the VS, C/N, NH₄⁺-N. At the level of microbial genus. Especially in the thermophilic phase, the carbon consumption and heat release in organic matter were intensified to increase the relative abundance of Thermobifida and Bacillus. Redundancy analysis indicated the positive correlations between Thermobifida/Bacillus and temperature, while the negative with C/N ratio. Saccharomonospora/Parapedobacter showed a positive correlation with the GI, while a negative with the VS. Therefore, the deflector can be expected to increase the airflow volume near the inlet, thus promoting the degradation and maturity of the composting pile. This finding can provide the technical support to optimize the ventilation pipe during manure composting.

Keywords: cattle manure; compost; deflector; ventilation pipe; microbial community