

基于水热协同效应的牛粪高效生物干化工艺及参数探究

吴佩佩, 李爱民*

大连理工大学环境学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年2月13日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

牛粪的高含水率限制了其资源化利用, 因此, 需要发展低碳节能的脱水预处理。其中, 生物干化虽具潜力, 但效率却受限于牛粪有机物的难降解特性。为强化牛粪生物干化的脱水效果, 研究通过单因素实验, 系统探究了回用接种比例、初始含水率、通风量及翻堆频率对干化进程的调控作用。结果表明, 工艺参数的优化能显著提升干化效能。在初始含水率60%、通风量 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、翻堆频率2 d/次的条件下, 回用接种比例为1:3时牛粪含水率下降最快, 反应周期可缩短至8 d, 水分去除率达84.96%。研究为牛粪生物干化工程的实际应用奠定了基础。

关键词

牛粪, 生物干化, 有机物降解, 含水率

Investigation of High-Efficiency Bio-Drying Process and Parameters for Cow Dung Based on Hydrothermal Synergistic Effect

Peipei Wu, Aimin Li*

School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: February 13, 2026; accepted: April 10, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

The high moisture content of cow dung restricts its resource utilization. Therefore, low-carbon and energy-efficient dewatering pretreatment is needed. Bio-drying has potential. However, its efficiency

*通讯作者。

文章引用: 吴佩佩, 李爱民. 基于水热协同效应的牛粪高效生物干化工艺及参数探究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(5): 764-777. DOI: [10.12677/aep.2026.165076](https://doi.org/10.12677/aep.2026.165076)

is constrained by the low biodegradability of organic matter in cow dung. To enhance the dewatering performance of cattle manure bio-drying, this study systematically investigated the regulatory effects of inoculum recycling ratio, initial moisture content, aeration rate, and turning frequency on the drying process through single-factor experiments. The results showed that coordinated optimization of process parameters significantly improved drying performance. Under 60% initial moisture, an aeration rate of 0.3 L·min⁻¹, and turning every 2 days, the inoculation ratio of 1:3 achieved the fastest moisture reduction. The drying period was shortened to 8 days, and the water removal rate reached 84.36%. This study provides a practical basis for the engineering application of cow dung bio-drying.

Keywords

Cow Dung, Bio-Drying, Organic Matter Degradation, Moisture Content

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着畜牧业规模化发展, 畜禽粪污年产量已超过 30 亿吨[1], 其中牛粪占比近半, 年产量约 14 亿吨[2], 成为农业环境管理的一大挑战。然而, 牛粪处置不当易造成环境污染与资源浪费[3]。目前, 牛粪资源化的主要途径包括好氧堆肥、厌氧发酵、垫料回用及热化学转化等[4], 但新鲜牛粪含水率高, 严重影响上述工艺的稳定运行与产物品质, 并制约资源化利用潜力[5][6]。因此, 实现牛粪高效脱水已成为推动其后续资源化利用的关键。

目前的脱水技术尚难以兼顾处理效率、能耗与可持续性。例如, 依赖化石能源的热干化技术能耗过高[7], 而太阳能等清洁能源技术则受限于稳定性不足[8]。在此背景下, 生物干化技术因其独特的脱水机制而受到关注。该技术通过微生物代谢产热耦合强制通风实现高效脱水, 具有能耗低、周期短、产物可资源化等优势, 在易降解有机固废领域已形成较完善的工艺体系。周亚文[9]研究了菌种对易腐生活垃圾生物干化的影响, 水分去除率最高达到了 95.13%。Zhao [10]等人研究了通风速率和翻堆频率对污泥生物干化过程中水分去除和生物质能利用的交互影响。结果显示, 通风速率加倍可使水分去除率提高 2.86% 至 11.5%。然而, 牛粪因高纤维、高结合水特性, 形成了持水性强、孔隙率低且透气性差的致密结构。这种与易降解体系在物料性质上的本质差异, 严重阻碍了基质内部水、热及氧气的有效传递, 导致生物干化过程迟滞[11][12], 是限制牛粪脱水的根本原因。

为提升干化效果, 有关学者提出对操作参数进行优化调控。例如, Zhang 等[13]通过改变通风方式与风量, 不仅高效去除了脱水污泥中的水分, 还通过优先降解脂质有效释放了结合水。Ma 等[7]进一步通过优化餐厨垃圾与污泥的混合比例, 实现了协同增强的脱水效果。Song 等[14]的研究也证实, 合理调控初始含水率与接种比例可显著缩短反应滞后期并提升厨余垃圾干燥性能。虽然部分学者考察了单一参数的影响, 但针对高纤维难降解的牛粪体系, 回用堆肥产品的接种比例与通风策略的协同匹配机制尚不明确, 且缺乏基于生物干化因子的系统评估。

为系统揭示各参数独立作用规律, 并为后续多因素交互机制的解析奠定基础, 本研究以牛粪为对象, 采用单因素实验设计, 探究四个关键工艺参数对生物干化过程的影响: 1) 回用接种比例对微生物活性及有机物降解的效果; 2) 初始含水率对温度与脱水效果的影响; 3) 通风量对热量积累与水分迁移的作用; 4) 翻堆频率对堆体结构均匀性及干化稳定性的优化。通过分析温度、含水率及挥发性固体等关键指标的

动态响应, 明确各参数的独立作用区间与优化路径。本研究旨在通过系统优化关键工艺参数, 并结合水分携带能力指数分析, 为揭示牛粪生物干化的水热传输机制提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

本实验所用的牛粪是取自辽宁省沈阳市辽中区养牛场的新鲜牛粪, 取样之后将样本保存在 4℃ 的冷藏环境中。实验所用的回用接种产品为牛粪和玉米芯经 8 d 高温堆肥后的腐熟产物。所用调理剂为 3~6 mm 均匀玉米芯颗粒。实验所用物料的基本性质见表 1。

Table 1. Physicochemical properties of the raw materials

表 1. 牛粪和玉米芯基本性质

原料	含水率/%	C/%	N/%	H/%	S/%	C/N	C/H	VS/%
牛粪	81.04 ± 2.66	37.33 ± 0.23	2.69 ± 0.04	5.16 ± 0.09	0.30 ± 0.01	13.90 ± 0.27	7.24 ± 0.08	77.05 ± 0.02
玉米芯	6.99 ± 0.09	46.57 ± 0.15	0.17 ± 0.01	5.93 ± 0.03	-	291.45 ± 3.00	7.84 ± 0.02	98.30 ± 0.13

2.2. 实验设计

实验运用单因素实验法, 根据现有研究深入探讨不同条件对牛粪生物干化效果的显著影响, 每个处理组设置 3 个重复。为确保初始物料的一致性, 所有重复试验所用的牛粪均取自同一批次并充分混合后分装。相关具体参数详见表 2。在整个实验过程中, 皆在相同的反应器内进行, 以切实确保基础条件的一致性。在此过程中, 选取玉米芯作为调理剂, 并按照 1:4 的比例与牛粪进行充分混合, 从而改善通气条件。

Table 2. Operational parameters of different groups of experiments

表 2. 生物干化各组影响因素实验操作参数

实验分组	菌种: 物料(kg, wb)	初始含水率(%)	通风量(L·min ⁻¹)	翻堆频率(d/次)	
实验 1: 回用接种比例影响	T1-A	1:2	60%	0.3	2
	T1-B	1:3	60%	0.3	2
	T1-C	1:4	60%	0.3	2
实验 2: 含水率影响	T2-A	1:3	50%	0.3	2
	T2-B	1:3	60%	0.3	2
	T2-C	1:3	70%	0.3	2
实验 3: 通风量影响	T3-A	1:3	60%	0.2	2
	T3-B	1:3	60%	0.3	2
	T3-C	1:3	60%	0.4	2
实验 4: 翻堆频率影响	T4-A	1:3	60%	0.3	2
	T4-B	1:3	60%	0.3	1

2.2.1. 回用接种比例影响

为研究回用接种比例对牛粪生物干化效果的影响, 本实验选取粒度 3~6 mm、含水率 6.99% 的玉米芯颗粒作为共干化介质, 按照湿基质量比 1:2、1:3、1:4 的比例将回用接种产品与牛粪混合, 并将初始含水

率调节至 60%左右(以实测值为准), 反应周期为 8 d, 风量控制在 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2.2.2. 初始含水率影响

为了探讨初始含水率对牛粪生物干化效果的影响, 本实验设置了三种不同初始含水率(50%、60%、70%)进行实验(以实测值为准), 选取回用接种比例为 1:3, 其余条件不变。

2.2.3. 通风量影响

通气是保证好氧发酵顺利进行的重要因素之一。为了探讨通风量对牛粪生物干化效果的影响, 本实验设置了三个通风量($0.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)进行实验, 初始含水率为调节至 60%左右(以实测值为准), 回用接种比例为 1:3, 其余条件不变。

2.2.4. 翻堆频率影响

翻堆是生物发酵过程必要的工艺操作。本实验设置了 1 d/次和 2 d/次两个翻堆频率, 初始含水率调节至 60%左右(以实测值为准), 回用接种比例为 1:3, 通风量为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 旨在确定牛粪生物干化过程中最适宜的翻堆频率。

2.3. 实验装置

本实验系统主要由生物干化反应单元、强制通风系统及数据监测系统三部分组成。

1) 生物干化反应单元

实验主体为圆柱形保温桶反应器(D×H:156 mm×179 mm, 有效容积: 2200 ml), 保温桶材质为聚丙烯颗粒。每次实验装填含水率调节后的混合物料 650 g。反应器底部设置曝气头, 同时顶部放置海绵, 吸收过程蒸发水汽, 防止冷凝水回流。

2) 强制通风系统

通风空气由空气泵提供, 为保持各组实验一致性, 避免空气湿度变化造成影响, 通入空气流经硅胶干燥柱去除水分, 经气体流量计控制流量后, 通过反应器底部微孔曝气管均匀通入堆体, 实现可控强制通风。

3) 数据监测系统

堆体核心温度通过 K 型热电偶(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)监测, 数据由温度模块自动记录并实时传输至计算机。实验期间, 每隔 2 d 开盖从反应器上/中/下层随机多点采样 10 g(取样后不进行任何物料补回), 混合均匀后进行测定。

2.4. 测试方法与数据处理

样品的总固体(TS)、挥发性固体(VS)及含水率(MC)的测定均参照美国公共卫生协会(APHA)发布的《水和废水检验标准方法》中的相关标准进行操作。总固体含量(Total Solid, TS)是指在 105°C 的条件下, 样品中的水分经过 24 小时蒸发后剩余的固体质量成分。而含水率(Moisture Content, MC)则是用来表示样品中水分含量的参数。挥发性固体(Volatile Solid, VS)是将总固体在 550°C 的高温下灼烧至重量不再变化, 此时挥发掉的固相成分主要是有机物质。所有样品均进行 3 次重复测定。试验数据采用 Office 2021 处理, Origin 软件用于绘图和分析。

3. 结果与讨论

3.1. 回用接种比例影响

回用接种量作为生物干化预处理的关键因素, 对微生物群落结构、功能菌群及有机物降解速率有直接影响。本研究根据表 2 中实验 1 的条件进行接种量实验, 图 1 显示了不同接种条件下干化过程中物料

温度、含水率及有机物含量的变化。

图 1(a)显示了牛粪在不同回用接种比例下生物干化的温度曲线。三组实验均快速进入升温期, 无显著停滞。其中, T1-B (1:3)处理堆体表现出最优的升温性能。在 0.5 d 达到峰值 58.0°C, 明显高于 T1-A (1:2) 和 T1-C (1:4)处理, 表明该比例可有效提升微生物的代谢活性。

图 1(b)和图 1(c)显示了牛粪在不同回用接种比例下生物干化的 MC 和 VS 变化曲线。经 8 d 干化后, T1-A (1:2)、T1-B (1:3)、T1-C (1:4)的含水率从初始的 62.5% 分别降至 53.1%、45.6% 和 50.1%。水分去除率分别为 47.88%、84.96% 和 54.54%。表明在接种比例为 1:3 时干化性能最优($p < 0.05$), 且水分的有效去除主要发生在高温阶段。在整个过程中, 各处理的 VS 含量持续下降。T1-B 处理的 VS 降解率最高(29.21%), 高于 T1-A 处理(13.74%)和 T1-C 处理(10.09%)。

生物干化因子是评估生物干化工艺效能的关键参数, 指单位挥发性固体降解量对应的水分去除量, 用于表征有机物利用效率和生物干化的整体效果。如图 1(d)所示, 当接种比例为 1:3 时, 生物干化因子达到最大值 5.73。

回用接种比例通过调控微生物生态与热质传递影响牛粪生物干化效率。本研究结果显示, 回用接种比例为 1:3 时, 接种微生物与牛粪原菌群达成生态平衡, 实现了群落的快速构建与高效代谢, 从而释放出大量代谢热并维持了稳定的高温阶段, 强化了产热与水分迁移的协同, 使堆体获得了最高水分去除率。相比之下, 接种比例为 1:4 处理因外源微生物数量不足, 难以在初期建立优势菌群, 导致升温缓慢、高温

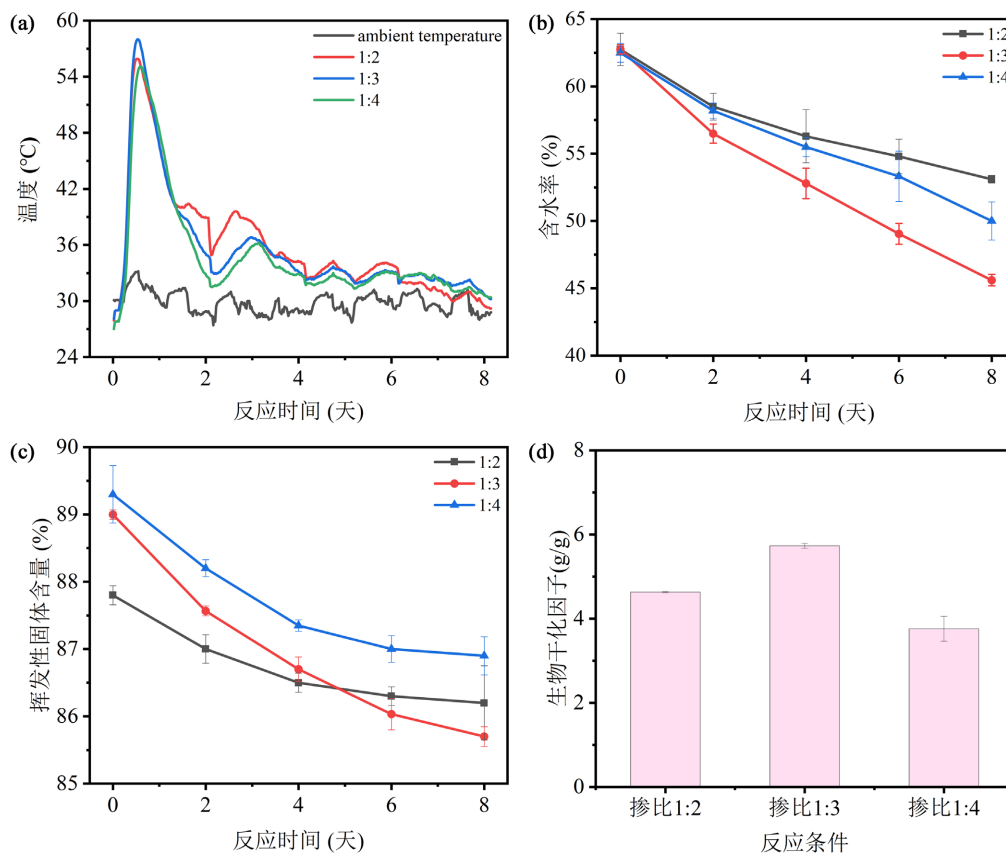


Figure 1. Temperature (a), moisture content (b), volatile solids/total solids ratio (c), and biodrying index (d) during co-biodrying experiments with different inoculation proportions of compost products

图 1. 不同堆肥产物接种比例下共生物干化过程中温度(a)、含水率(b)、挥发性固体/总固体比值(c)及生物干化指数(d)的变化

期短、VS 降解率低, 产热不足制约了水分蒸发, 导致干化效率受限。接种比例为 1:2 时, 过高的接种量加剧了微生物对底物和氧气的竞争, 导致能量更多用于维持代谢而非产热, 造成热生成与水分传递的过程解耦。因此, 尽管 VS 降解较快, 水分去除效率反而降低, 与 Xiao 等人报道的关于过量接种导致系统失衡的结论一致[15]。

优化回用接种比例有效构建了高效代谢的微生物群落, 实现了稳定的高温产热与水分迁移, 但微生物功能的充分发挥高度依赖于堆体内部的物理环境。水分作为微生物代谢的介质及热量与质量传递的载体, 影响微生物活性和氧气扩散。因此, 需研究初始含水率对牛粪生物干化的影响, 阐明水分如何调控微生物活性和热质传递, 影响脱水效能。

3.2. 初始含水率的影响

物料的初始含水率显著影响微生物代谢和有机物降解, 并决定干化产物的稳定性及利用价值。本研究基于表 2 中的实验 2 条件进行含水率影响实验。图 2 展示了干化过程中温度、含水率和 VS 随时间的动态变化。

图 2(a)显示了牛粪在不同初始含水率下生物干化的温度曲线。由图可知, T2-A (50%)、T2-B (60%)、T2-C (70%)三组实验, 堆体温度均在 0.5 d 附近升至最高温, 分别为 50.1°C、59.7°C、56.5°C。第一次翻堆后, 堆体的温度有小幅恢复。随着生物干化的进行, 体系内堆体温度逐步下降并趋于稳定。

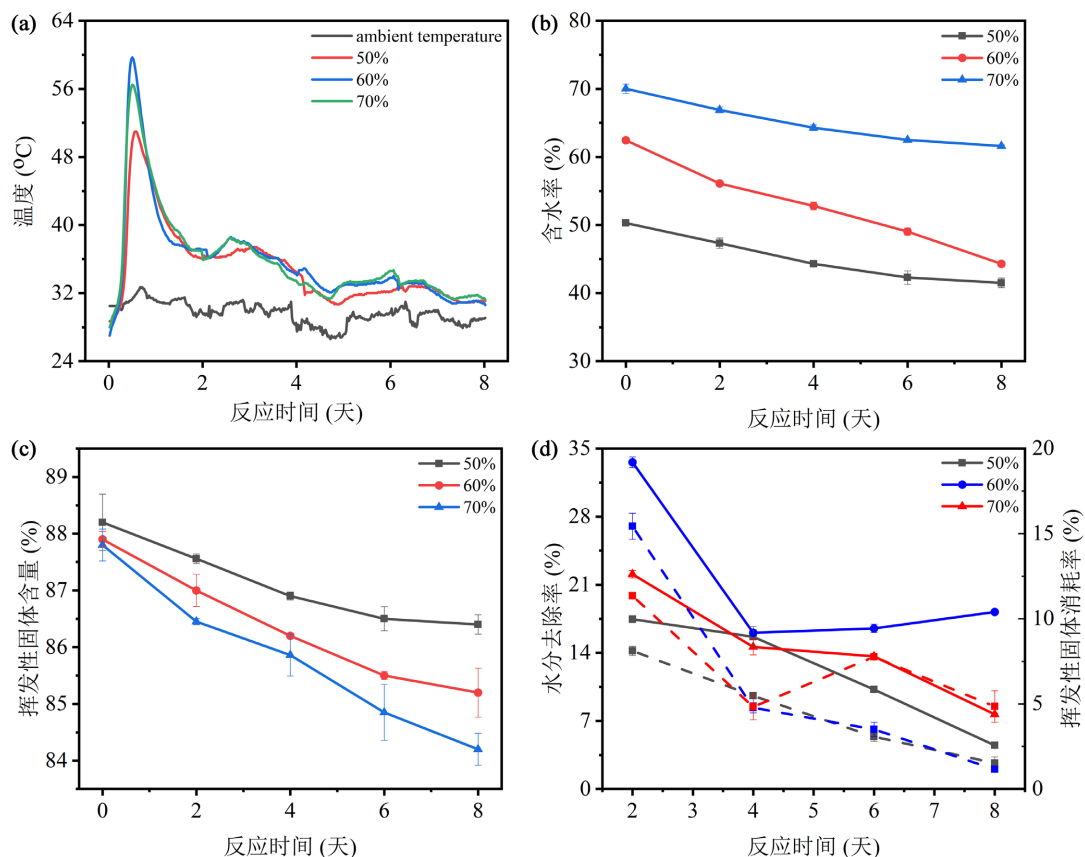


Figure 2. Temperature (a), moisture content (b), volatile solids content (c), and water removal rate & volatile solids consumption rate (d) during bio-drying experiments with different initial moisture contents

图 2. 不同初始含水率生物干化实验中物料温度(a)、含水率(b)、挥发性固体含量(c)及水分去除率和挥发性固体消耗率(d)的变化

图 2(b)和图 2(c)显示了牛粪在不同初始含水率下生物干化的 MC 和 VS 变化曲线。经 8 d 干化, T2-B (60%)处理的水分去除率最高, 达 84.36%, 该值显著高于 T2-A (47.83%)与 T2-C (57.99%)处理($p < 0.05$)。三组实验的 VS 含量均持续下降。一个值得关注的现象是, VS 消耗比率最高的 T2-C 处理(25.95%), 其水分去除率却并非最优。

初始含水率在牛粪生物干化效率中起着关键作用, 它通过影响微生物活性、代谢产热和水汽迁移, 决定系统效能。实验发现, 初始含水率为 60%的处理组在水分去除速率和干化效率上表现最优。这是因为 60%的含水率既保障了微生物的生长和代谢活动, 又维持了堆体的孔隙度, 有利于氧气扩散[16]。在此理想状态下, 微生物群落能快速形成, 高效分解有机物, 释放代谢热, 驱动水蒸气迁移, 实现高效水分去除。当初始含水率为 50%时, 微生物细胞处于水分胁迫状态, 导致酶活性下降[17]、代谢通量减少及群落构建迟缓。这使得代谢产热不足, 难以维持持久的高温期, 水分蒸发的热驱动效应减弱, 最终表现为脱水缓慢。含水率 70%处理组因水分过高, 占据堆体孔隙, 阻碍氧气传递, 诱发厌氧微区, 抑制嗜热好氧微生物活性, 减少有效热量蒸发水分。虽然有机物降解度高, 但水分脱除效率低于 60%处理组。这表明高含水率下, 微生物代谢能多用于底物分解而非产热, 导致脱水动力不足。

通过优化微生物群落结构和代谢功能, 系统的产热潜能得到显著提升。通过调控初始含水率为微生物代谢产热和系统内水分蒸发提供了适宜环境。然而, 生物干化是微生物好氧代谢产热与通风对流水汽排出的协同作用。通风量决定了生物产热向水分蒸发潜热转化的效率。因此, 需系统探究通风量对牛粪生物干化的影响, 以揭示热量生成与水分排出的调控机制, 实现脱水效率的最大化。

3.3. 通风量的影响

通风在生物干化过程中起着至关重要的作用。研究显示, 精准调节通风强度是协调干燥速率与能耗平衡、提升干化效率的核心方法。本研究依据表 2 中的实验 3 条件进行通风量实验, 图 3 展示了在不同通风量条件下生物干化实验中物料温度、含水率以及有机物含量的变化过程。

图 3(a)是牛粪在不同通风量条件下生物干化的温度变化曲线。在 T3-A ($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)处理中, 物料温度在 0.48 d 上升至 55.8°C , 并维持在 40°C 约 3 天。T3-B ($0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)物料温度在 0.34 d 上升至 56.1°C , 维持在 40°C 约 1.1 d, T3-C ($0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)物料温度在 0.58 d 达到了 51.9°C , 并维持 40°C 约 0.76 d。结果清晰表明, 较低的通风量更有利于物料升温并延长高温时间。

图 3(b)和图 3(c)显示了不同通风量条件下牛粪生物干化过程中的 MC 和 VS 变化曲线。整体来看, 三组实验的含水率均随时间的延长逐渐降低。其中 T3-C ($0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)的含水率下降最快, 8 d 后降至约 43.2%; T3-B ($0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)次之, 最终含水率为 46.5%; 而 T3-A ($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 8 d 后仍保持在约 54.3% ($p < 0.05$)。结合水分去除量可知, 堆体中水分的去除主要集中在高温期间。生物干化处理后, 各处理组的 VS 含量均呈下降趋势, 表明干化过程中有机质持续分解。实验 T3-B 的 VS 降幅最大, T3-C ($0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)次之, 而 T3-A ($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)的 VS 基本保持稳定, 仅略有下降($p < 0.05$)。

为定量评价通风对水分脱除的贡献, 引入了水分携带能力指数($C_{\text{air-flow}}$)。生物干化过程中, 尽管 T3-A ($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)的物料温度高于其他两组, 但是 T3-B ($0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)和 T3-C ($0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)组的 $C_{\text{air-flow}}$ 指数始终大于 T3-A ($0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)。

在生物干化过程中, 通风量是调控微生物代谢活性、体系热量平衡与水分迁移效率的核心操作参数。在 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 低通风条件下, 系统呈现出“高温蓄热 - 排水受限”的特点。由于通风量低, 对流散热效应减弱, 微生物代谢热量易于积累, 使堆体温度较高, 利于水分蒸发。但 $C_{\text{air-flow}}$ 指数最低, 说明堆体内部空气流通性差, 孔隙结构因水分滞留而致密, 导致水汽无法有效排出, 内部湿饱和度过高, 抑制了水分的净脱除效率。在 $0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 高通风条件下, 系统运行模式为“气流驱动 - 热抑制”。强通风对流提

升 $C_{\text{air-flow}}$ 指数, 但过量通风导致显热损失, 堆体温度降低, 抑制嗜热微生物活性, 削弱生物产热能力, VS 降解率较低。在实际工程中, 通风系统为主要能耗单元, 高通风量增加运行成本和尾气处理负荷。在通风量为 $0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 下, 系统实现了热生成与水汽排出的高效协同, 保持了高温阶段, 其 $C_{\text{air-flow}}$ 指数显著高于低通风组, 表明堆体形成了利于气体扩散与水分传输的孔隙结构。通风量满足好氧微生物代谢需求, 提供生物热能, 同时确保水汽及时排出, 避免孔隙水堵塞。因此, 该处理实现了最大的挥发性固体 (VS) 降解幅度、最高的系统能量利用率以及卓越的综合干化效率。

尽管通过调节回用接种比例、设置合适的初始含水率以及优化通风量, 可以在一定程度上实现代谢产热与水汽迁移之间的协同平衡, 从而提高系统的脱水效率。但在牛粪生物干化过程中, 经常出现板结、孔隙塌陷和氧气分布不均等问题, 这些问题会严重影响传质效率。翻堆作为一种物理扰动手段, 能够有效破除板结层、恢复孔隙结构、改善氧气分布, 并提高微生物与底物之间的接触效率。然而, 翻堆操作也会导致显热损失, 影响产热向水分蒸发潜热的转化效率。因此, 需探究翻堆频率对热质传递稳定性及脱水效能的影响, 以揭示翻堆在生物干化过程中的调控机制。

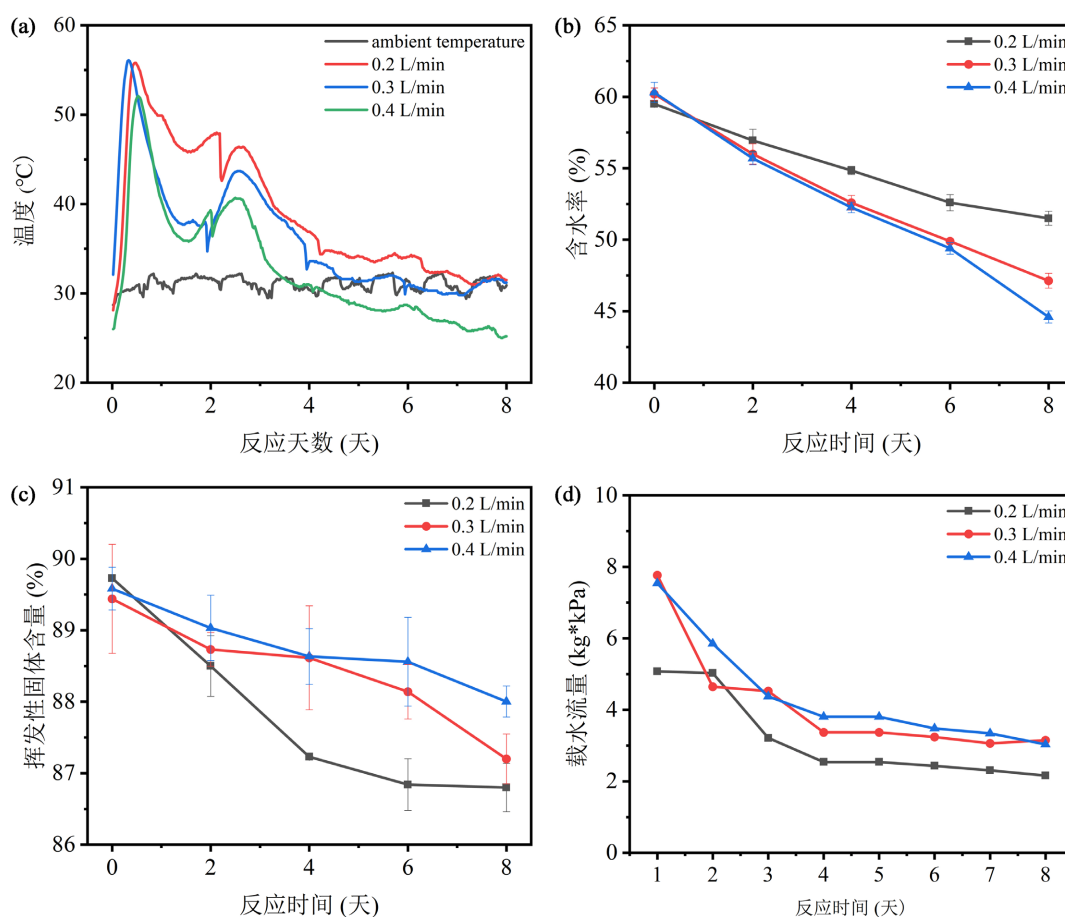


Figure 3. Changes in material temperature (a), moisture content (b), volatile solids content (c), and $C_{\text{air-flow}}$ index (d) during bio-drying experiments under different initial ventilation rates

图 3. 不同初始通风量条件下生物干化实验中物料温度(a)、含水率(b)、挥发性固体含量(c)及 $C_{\text{air-flow}}$ 指数(d)的变化

3.4. 翻堆频率的影响

翻堆频率影响物料的通透性和氧气传质效率, 合理翻堆能破碎团聚结构, 促进水分蒸发, 维持微生物

物活性。但频率过高可能导致热量过度散失, 反而不利于干化效率提升。本研究根据表 2 中的实验 4 进行翻堆频率实验, 图 4 展示不同翻堆条件下物料温度、含水率及有机物含量的变化规律。

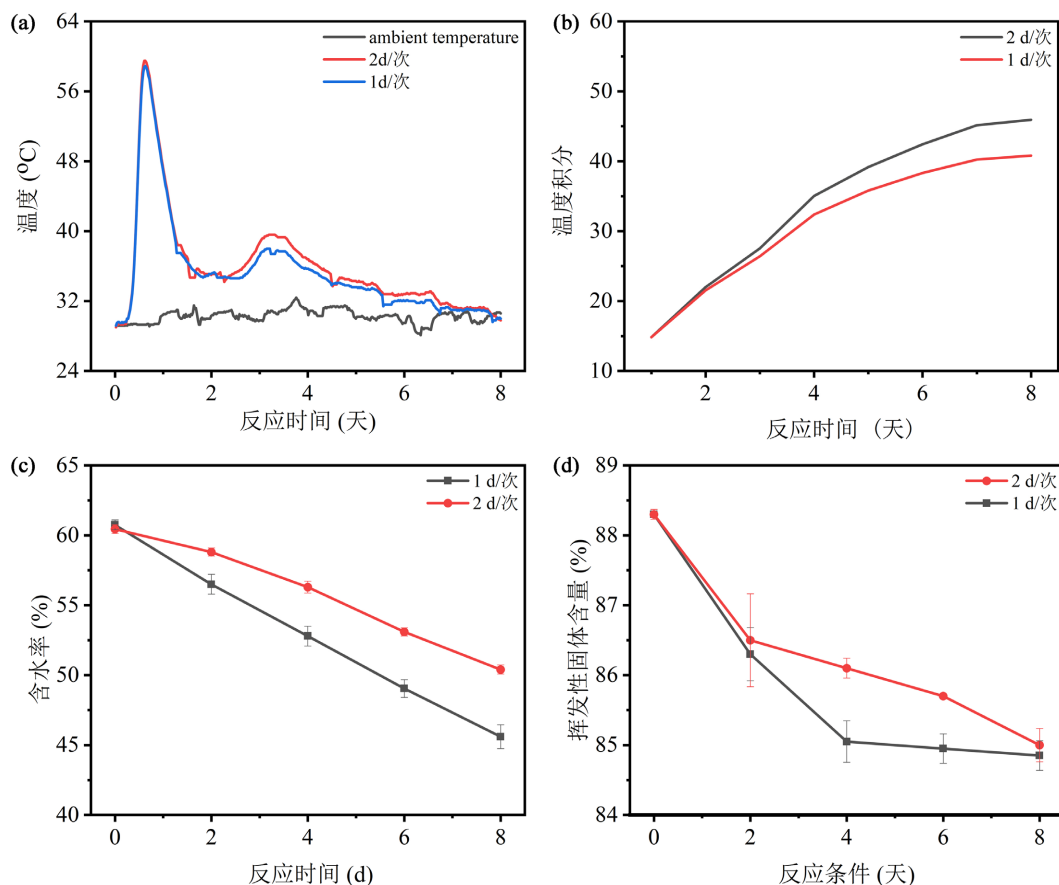


Figure 4. Effects of different turning frequencies on temperature (a), temperature integral (b), moisture content (c), and VS content (d) during bio-drying

图 4. 不同翻堆频率对生物干化过程中温度(a)、温度积分(b)、含水率(c)及 VS 含量(d)的影响

图 4(a)是在不同翻堆频率下牛粪生物干化的温度变化曲线。如图所示, 两组实验堆体温度变化趋势基本一致, 先后经历了升温期、高温期和降温期 3 个阶段。在 T4-A (2 d/次)处理中, 其最高温度达到 59.5°C, 高于 T4-B (1 d/次)处理的最髙温 58.6°C。此外, 在整个实验过程中, T4-A (2 d/次)的堆体温度始终略高于 T4-B (1 d/次), 其累积温度积分也相应较高。

图 4(b)和图 4(c)是在不同翻堆频率下牛粪生物干化的 MC 和 VS 曲线。T4-A (2 d/次)的翻堆频率表现出明显生物水分脱除优势。干化结束时, 该处理下物料含水率由初始 62.5%降至 45.6%, 显著低于 T4-B (1 d/次)的 48.4%。T4-A(2 d/次)的水分去除率为 68.2%, 也高于 T4-B (1 d/次)的 63.5%。在有机物降解方面, T4-B (1 d/次)的高频翻堆处理在干化中期(2~4 d)表现出更高的 VS 消耗速率(见图 4(d))。然而, 生物干化处理后两组处理的总 VS 消耗率无显著差异($p > 0.05$), 这表明高频翻堆对降解的促进作用具有阶段性。

翻堆能够有效破坏牛粪的板结层, 从而改善氧气在堆体中的分布状况, 并提高微生物的接触效率。作为一种强烈的物理扰动手段, 翻堆会引发堆体与环境之间的强制对流换热, 进而导致明显的显热损失。1 d/次的温度积分曲线也直接反映了这一点, 即由于频繁翻堆而导致的额外热损失, 实际上减少了可用于水分相变的有效热能。这可能是虽然该处理组在中期表现出较高的降解活跃度, 但其最终脱水效率和水

分去除率却相对较低的主要原因。2 d/次的低频翻堆有助于维持堆体温度与湿度梯度的稳定。与污泥干化研究的结果一致, 稳定的热质传递梯度是热干化过程中实现高效脱水的关键结论[18]。同样, 在本研究的生物干化体系中, 这种稳定状态可能更利于牛粪中结合水的迁移与脱除, 防止其因频繁混合而滞留。

4. 结论

1) 明确了最优工况: 本研究确定了牛粪生物干化的最佳单因素条件为: 回用接种比例 1:3、初始含水率 60%、通风量 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 及翻堆频率 2 d/次。在此工况下, 反应周期缩短至 8 d, 水分去除率高达 84.96%。

2) 揭示了调控机制: 研究发现, 水热平衡是制约牛粪干化效率的核心机制。适宜的接种比例加速了启动期的热积累, 而 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的通风量在维持高 $C_{\text{air-flow}}$ 指数的同时避免了过度的显热损失, 实现了效能最大化。

3) 局限与展望: 本研究主要基于单因素实验, 未能完全揭示参数间的交互作用。未来的工作将聚焦于多因素响应面优化及微生物群落演替机制, 并进一步评估该工艺在低温环境下的适应性及能耗经济。

参考文献

- [1] 邵聪. 生物炭联合铁氧化物应用于牛粪好氧堆肥效果分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北农林科技大学, 2025.
- [2] 屈璐璐, 刘芳, 贾海凤, 王超. 我国牛粪污资源化利用研究进展[J]. 现代畜牧兽医, 2025(1): 80-84.
- [3] Tufaner, F. and Avşar, Y. (2016) Effects of Co-Substrate on Biogas Production from Cattle Manure: A Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **13**, 2303-2312. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1069-1>
- [4] Font-Palma, C. (2019) Methods for the Treatment of Cattle Manure—A Review. *C*, **5**, Article No. 27. <https://doi.org/10.3390/c5020027>
- [5] Khoshnevisan, B., Duan, N., Tsapekos, P., Awasthi, M.K., Liu, Z., Mohammadi, A., et al. (2021) A Critical Review on Livestock Manure Biorefinery Technologies: Sustainability, Challenges, and Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **135**, Article ID: 110033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110033>
- [6] Bao, Y., Fu, Y., Wang, C. and Wang, H. (2021) An Effective Integrated System Used in Separating for Anaerobic Digestate and Concentrating for Biogas Slurry. *Environmental Technology*, **42**, 4434-4443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1761457>
- [7] Ma, J., Zhang, L. and Li, A. (2016) Energy-Efficient Co-Biodrying of Dewatered Sludge and Food Waste: Synergistic Enhancement and Variables Investigation. *Waste Management*, **56**, 411-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.007>
- [8] Mathioudakis, V.L., Kapagiannidis, A.G., Athanasoulia, E., Paltzoglou, A.D., Melidis, P. and Aivasidis, A. (2013) Sewage Sludge Solar Drying: Experiences from the First Pilot-Scale Application in Greece. *Drying Technology*, **31**, 519-526. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.744998>
- [9] 周亚文. 易腐生活垃圾生物干化研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- [10] Zhao, L., Gu, W., He, P. and Shao, L. (2010) Effect of Air-Flow Rate and Turning Frequency on Bio-Drying of Dewatered Sludge. *Water Research*, **44**, 6144-6152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.002>
- [11] Li, Y., Zhao, J., Krooneman, J. and Euverink, G.J.W. (2021) Strategies to Boost Anaerobic Digestion Performance of Cow Manure: Laboratory Achievements and Their Full-Scale Application Potential. *Science of the Total Environment*, **755**, Article ID: 142940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142940>
- [12] Kim, E., Lee, D., Won, S. and Ahn, H. (2015) Evaluation of Optimum Moisture Content for Composting of Beef Manure and Bedding Material Mixtures Using Oxygen Uptake Measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, **29**, 753-758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
- [13] Zhang, C., Li, Y., Yu, Z., Liu, Y. and Dong, L. (2024) Effectiveness of Biological Drying for Citric Acid Dewatered Sludge: Evaluating the Impact of Energy-Efficient Ventilation Strategies. *Waste Management*, **182**, 237-249. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.038>
- [14] Song, X., Ma, J., Gao, J., Liu, Y., Hao, Y., Li, W., et al. (2017) Optimization of Bio-Drying of Kitchen Waste: Inoculation, Initial Moisture Content and Bulking Agents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **19**, 496-504. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0450-3>

- [15] Xiao, Y., Mackey, H.R., Tang, W., Lu, H. and Hao, T. (2024) Disentangling Microbial Niche Balance and Intermediates' Trade-Offs for Anaerobic Digestion Stability and Regulation. *Water Research*, **261**, Article ID: 122000. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122000>
- [16] Zhang, S., Zhong, B., An, X., Han, Y., Xiao, X. and Zhang, Q. (2022) Effect of Moisture Content on the Evolution of Bacterial Communities and Organic Matter Degradation during Bioaugmented Biogas Residues Composting. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **39**, 1. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03454-7>
- [17] 张奎, 刘旭洁, 唐恺, 邓杰, 玥玥, 师雄, 魏雨泉, 李季. 油脂对餐厨废弃物生物干化除水效率的影响[J]. *环境工程*, 2025, 43(5):100-107.
- [18] Bellaziz, Y., Berroug, F., Ouazzani, N., Bahammou, Y., Mandi, L., Nouh, F.A., *et al.* (2025) Optimizing Convective Drying for Efficient Reduction of Phosphate Sludge Moisture: Experimental Investigations and Mathematical Modeling. *Water-Energy Nexus*, **8**, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.08.001>

附录

1. 关于取样量、取样后是否补回惰性物料、称重时是否扣除取样质量

实验过程中未补充任何惰性物料。该反应过程中取样会导致反应器内总固体质量略有减少,但在计算方法中,这一影响已通过“灰分守恒”原则进行了修正,因此不影响最终关键指标的计算。每次取样后,会对反应器进行整体称重,并记录取样后的新总质量。然而,核心计算(如水分去除率、VS消耗率)并未直接使用这些过程中称重的总质量,而是基于灰分平衡原理推导得出。过程称重仅用于监控趋势。

2. 关于进气湿度可能带来的混杂影响

由于进气已通过硅胶干燥,在计算空气携水能力时,可近似认为进气相对湿度为0%,出口空气达到饱和。这一假设基于实验设计中的除湿处理,具有合理性,且所有处理组条件一致,不影响处理间的相对比较。

3. 水分去除率

$$R_m = \frac{M_{w,initial} - M_{w,final}}{M_{w,initial}}$$

式中(R_m , %)为水分去除率, ($M_{w,initial}$, g)为初始物料中的水分质量, ($M_{w,final}$, g)为最终物料中的水分质量。

4. Biodrying Index

$$BI = \frac{\Delta M_w}{\Delta M_{vs}}$$

式中(BI , g/g)为生物干化因子, (ΔM_w , g)为去除的水分质量, (ΔM_{vs} , g)为降解的挥发性固体质量。

5. $C_{air-flow}$

$$C_{air-flow} = M_{dryair} * (p_{vi} - p_{v0}) * 0.133$$

式中 p_v (mm Hg) 为水蒸气压力, 可通过水蒸气饱和压力 (p_{vs} , mm Hg) 和空气相对湿度 (RH) 求得, 其中假设空气出气达到饱和, 且因硅胶脱水, 进气认定为干空气。单位 mm Hg 和 kPa 的换算系数为常数 0.133。

6. 干基转换方式与质量衡算边界

本研究中, 所有样品的含水率 (MC) 和挥发性固体 (VS) 含量均基于以下公式进行湿基与干基的转换。

1) 干物质含量 (Total Solids, TS):

$$TS = 100\% - MC_{wet}$$

2) 干基含水率 (Moisture Content on Dry Basis):

$$MC_{db} = \frac{MC_{wet}}{1 - MC_{wet}}$$

式中: MC_{wet} 为湿基含水率(%), MC_{db} 为干基含水率(%)(g 水/g 干物质)。

3) 挥发性固体含量(干基):

$$VS_{db} = \frac{m_{vs}}{m_{dry}}$$

式中: m_{vs} 为挥发性固体质量(g), m_{dry} 为干物质质量(g)。

4) VS 降解率:

$$VS_{degradation} = \frac{VS_{initial} - VS_{final}}{VS_{initial}} \times 100\%$$

式中: $VS_{initial}$ 和 VS_{final} 分别为初始和最终的挥发性固体含量(均以干基计)。

7. 质量衡算边界

本研究以生物干化反应器为系统边界, 基于质量守恒定律建立质量衡算模型。衡算体系包括固相(干物质、灰分、挥发性固体)、液相(水分)和气相(排放气体)三部分。

1) 系统初始状态($t = 0$)

$$\text{初始湿物料总质量: } M_{total}(0) = M_{wet,initial}$$

$$\text{初始水分质量: } M_w(0) = M_{total}(0) \times MC_{wet}(0)$$

$$\text{初始干物质质量: } M_{dry}(0) = M_{total}(0) \times (1 - MC_{wet}(0))$$

$$\text{初始挥发性固体质量: } M_{vs}(0) = M_{dry}(0) \times VS_{db}(0)$$

$$\text{初始灰分质量: } M_{ash}(0) = M_{dry}(0) \times (1 - VS_{db}(0))$$

2) 系统结束状态($t =$ 干化结束)

$$\text{最终湿物料总质量: } M_{total}(t) = M_{wet,final}$$

$$\text{最终水分质量: } M_w(t) = M_{total}(t) \times MC_{wet}(t)$$

$$\text{最终干物质质量: } M_{dry}(t) = M_{total}(t) \times (1 - MC_{wet}(t))$$

$$\text{最终挥发性固体质量: } M_{vs}(t) = M_{dry}(t) \times VS_{db}(t)$$

最终灰分质量: 基于灰分守恒假设, 有:

$$M_{ash}(t) = M_{ash}(0)$$

$$M_{dry}(t) \times (1 - VS_{db}(t)) = M_{dry}(0) \times (1 - VS_{db}(0))$$

3) 系统损失项

系统总质量损失等于水分蒸发损失与挥发性固体降解损失之和:

$$\Delta M_{total} = \Delta M_w + \Delta M_{vs}$$

$\Delta M_w = M_w(0) - M_w(t)$, 为水分蒸发损失, 随通风气流以水蒸气形式带走;

$\Delta M_{vs} = M_{vs}(0) - M_{vs}(t)$, 为挥发性固体降解损失, 以 CO_2 等形式释放。

8. 示例

反应器中牛粪质量为 650 g, 牛粪初始含水率为 59.8%, 初始 VS/TS 为 89.79%, 经过两天干燥后含水率变为 55.38%, VS/TS 为 89.35%。

初始干物质与水分质量:

$$M_{dry}(0) = 650 \times (1 - 0.598) = 650 \times 0.402 = 261.30 \text{ g}$$

$$M_w(0) = 650 \times 0.598 = 388.70 \text{ g}$$

$$M_{vs}(0) = 261.30 \times 0.8979 = 234.62 \text{ g}$$

$$M_{ash}(0) = 261.30 - 234.62 = 26.68 \text{ g}$$

两天后干物质与水分质量(灰分不变):

$$M_{dry}(2) = \frac{M_{ash}(0)}{1 - VS_{db}(2)} = \frac{26.68}{1 - 0.8935} = \frac{26.68}{0.1065} = 250.52 \text{ g}$$

$$M_{vs}(2) = 250.52 \times 0.8935 = 223.84 \text{ g}$$

湿物料总质量:

$$M_{total}(2) = \frac{M_{dry}(2)}{1 - MC_{wet}(2)} = \frac{250.52}{1 - 0.5538} = \frac{229.01}{0.4462} = 561.45 \text{ g}$$

$$M_w(2) = 561.45 \times 0.5538 = 310.93 \text{ g}$$

$$\text{水分去除量: } \Delta M_w = 388.70 - 310.93 = 77.77$$

$$\text{VS 降解量: } \Delta M_{vs} = 234.62 - 223.84 = 10.78$$

水分去除率:

$$R_m = \frac{77.77}{388.70} \times 100\% = 20.01\%$$

生物干化指数:

$$BI = \frac{77.77}{10.78} = 7.26 \text{ g 水/g VS}$$