

鸡粪中低温干燥动力学特性与参数优化

李绚阳^{1,2}, 李保明^{1,2,3*}, 郑炜超^{1,2,3}, 魏永祥^{1,2}, 张智^{1,2}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;
3. 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 为了研究鸡粪的中低温干燥特性, 利用恒温鼓风干燥箱, 以干燥温度、粪层厚度、风速为因素研究了鸡粪含水率和干燥速率随时间变化的规律, 用常见的薄层干燥模型对鸡粪的干燥曲线进行了拟合分析, 并用正交试验优化了鸡粪干燥工艺参数。结果表明: 鸡粪的中低温干燥过程由2个降速阶段组成, 第2降速阶段的干燥速率相对于第1降速阶段下降更快。干燥温度越高, 粪层厚度越小, 风速越大, 干燥速率曲线出现拐点的时间越早, 达到干燥平衡所用时间越短; Exponential模型能较好的模拟鸡粪的干燥过程; 在中低温条件下, 根据Fick定律得到2~6 cm粪层厚度鸡粪的有效扩散系数在 $2.25 \times 10^{-7} \sim 2.35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ 间; 用正交试验得到鸡粪中低温干燥时效率最高的工艺为: 干燥温度55℃, 粪层厚度6 cm, 风速1.2 m/s, 该工艺下鸡粪的干燥效率为0.47 h/g。

关键词: 干燥; 粪; 模型; 中低温; Exponential模型; 有效扩散系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.024

中图分类号: S210.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-10-0194-06

李绚阳, 李保明, 郑炜超, 魏永祥, 张智. 鸡粪中低温干燥动力学特性与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 194—199. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.024 http://www.tcsae.org

Li Xuanyang, Li Baoming, Zheng Weichao, Wei Yongxiang, Zhang Zhi. Middle-low temperature drying dynamic characteristics for poultry manure and its parameter optimization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 194—199. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.024 http://www.tcsae.org

0 引言

2017年中国蛋鸡存栏约为14亿只, 年产鸡粪约0.56亿t, 大量的鸡粪给环保造成了巨大的压力, 鸡粪的处理直接关系到蛋鸡产业的健康、稳定和持续发展^[1-2]。鸡粪干燥可以阻断新鲜粪便在发酵过程中产生的异味, 当新鲜鸡粪的含水率从70%降到20%, 臭气浓度可以降低1000倍^[3]。同时鸡粪干燥可杀灭部分细菌, 减少病虫害滋生, 以及其他对环境和人员带来的损害, 还能减少60%以上的细小粉尘, 降低畜禽和工作人员肺病的发生^[4]。干燥后的鸡粪含有大量的氮元素且适合长期储存, 并可大幅度降低运输和储存成本, 是加工有机颗粒肥最好的基础材料^[5]。

鸡粪属于高湿多孔物料。高湿多孔物料含自由水较多, 具有很好的热敏性, 很容易达到干燥的目的^[6-8]。从20世纪70年代开始国外就有较多鸡粪干燥的研究, 达尔豪斯大学的Ghaly和MacDonald^[9]研究了温度、粪层厚度对鸡粪干燥特性的影响及温度和粪层厚度对氮素损失和杀菌的影响, 并计算出了鸡粪干燥过程中的扩散系数, 最终得出了鸡粪的干燥模型。

拉脱维亚大学的Aboltins^[10]和Kic^[11]研究了穿流干燥过程中温度和风速对干燥过程的影响。捷克大学Kic等^[11]研究了不同风速对鸡粪对流干燥过程影响并结合费克定理推导出了鸡粪的扩散系数, Liska与Kic^[12]研究了鸡粪在不同温度下(70~110℃)的脱水特性。目前国内鸡粪的干燥研究中, 大多研究的是中高温干燥, 如赵广播等^[13]研究了鸡粪在不同风速(0.5, 0.85, 1.2 m/s)和不同温度(60, 90, 120℃)条件下的干燥特性, 韩捷等^[14]利用鸡粪快速烘干成套设备研究了鸡粪在高温下的快速烘干特性。

综上, 鸡粪干燥特性已有较多研究, 但国内外对于鸡粪中低温干燥特性的研究较少。中低温干燥, 例如太阳能干燥技术、鸡舍余热利用技术等都可应用于鸡粪干燥, 且太阳能干燥技术已被广泛应用于烟草、水果、谷物、木材、鲜花、蔬菜等农副产品及污泥、橡胶、陶瓷等高湿物料的干燥^[15-21]。选择中低温干燥可以减少能耗, 因此, 有必要对鸡粪进行中低温干燥特性的研究, 为太阳能干燥技术、鸡舍余热利用技术等中低温干燥技术在鸡粪干燥中的应用提供理论支撑, 为后续利用鸡舍余热干燥鸡粪提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验样品与仪器设备

试验用的鸡粪样品取自中国农业大学上庄试验站栖架养殖蛋鸡舍(鸡龄为55周)。鸡粪样品为未经任何处理的新鲜鸡粪, 含水率约为76.4%, 灰分质量分数约为

收稿日期: 2017-11-14 修订日期: 2018-02-26

基金项目: 国家蛋鸡产业技术体系(CARS-40)

作者简介: 李绚阳, 博士生, 主要从事畜禽养殖废弃物资源化利用方面的研究。Email: 541533870@qq.com

*通信作者: 李保明, 教授, 博士生导师, 主要从事畜禽设施养殖工艺与环境研究。Email: libm@cau.edu.cn

27.2%, 挥发性固体质量分数约为 72.8%, pH 值为 8.1。取完样后立即装进保鲜袋送往中国农业大学能源增值试验室进行冷冻保存 (储存温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

试验仪器: DHG-9013A 型风速可控电热鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司); ME104E 型电子天平 (塞多利斯科学仪器有限公司); 直径 6 cm 的不锈钢圆形托盘 (杰域厨具公司); 175H1 型温湿度传感器 (德国德图仪器公司); QDF-2B 型热球式风速仪 (上海亿欧仪表设备有限公司)。

1.2 试验方法

在电热鼓风干燥箱中分别对干燥温度、粪层厚度、风速进行单因素干燥试验, 试验分为 3 组进行。1) 固定粪层厚度 4 cm, 风速 0.8 m/s, 调整干燥温度为 35, 45, 55 $^{\circ}\text{C}$; 2) 固定干燥温度 45 $^{\circ}\text{C}$, 风速 0.8 m/s, 调整粪层厚度为 2, 4, 6 cm。3) 固定粪层厚度 4 cm, 干燥温度 45 $^{\circ}\text{C}$, 调整风速为 0.4, 0.8, 1.2 m/s。

为了确定鸡粪中低温干燥的最佳工艺参数, 在上述单因素试验结果的基础上, 设计三因素三水平的正交试验: 干燥温度 (35, 45, 55 $^{\circ}\text{C}$)、粪层厚度 (2, 4, 6 cm)、风速 (0.4, 0.8, 1.2 m/s), 具体试验参数设置按照 L9 正交试验表进行。

干燥方法: 将鸡粪从冰箱取出后先在常温下解冻 6 h, 按照上述不同试验分组的参数要求设定干燥温度、粪层厚度和风速, 用不锈钢圆形托盘盛放鸡粪, 然后待电热鼓风干燥箱的温度和风速稳定后将鸡粪放入, 开始进行干燥, 每隔 2 h 测 1 次干燥箱内鸡粪的质量, 记录鸡粪干基含水率随时间的变化情况, 直至鸡粪的干基含水率降至 0.1 以下, 停止试验。

1.3 鸡粪干燥参数的计算

鸡粪干基含水率 (X), 是指鸡粪中的水分质量与干鸡粪质量之比, 即

$$X = m / m_0 \quad (1)$$

式中 X 为鸡粪的干基含水率, g/g; m 为鸡粪中水分的质量, g; m_0 为绝干鸡粪的质量, g。

鸡粪水分比 (MR) 的表达式为

$$\text{MR} = (X_t - X_e) / (X_0 - X_e) \quad (2)$$

式中 MR 为鸡粪水分比; X_t 为干燥过程中 t 时刻鸡粪的干基含水率, g/g; X_e 为干燥平衡时 (鸡粪质量不再变化时) 鸡粪的干基含水率, g/g; X_0 为鸡粪的初始干基含水率, g/g。

由于 X_e 相对于 X_t 和 X_0 很小, 可以忽略不计, 因此式 (2) 可简化为

$$\text{MR} = X_t / X_0 \quad (3)$$

鸡粪干燥速率 (M_R) 是指单位质量干鸡粪在单位时间内蒸发水分质量, 即

$$M_R = -(X_{t+\Delta t} - X_t) / \Delta t \quad (4)$$

式中 M_R 为鸡粪的干燥速率, g / (g·h); $X_{t+\Delta t}$ 、 X_t 分别是单位质量鸡粪在 Δt 时间间隔开始和结束时鸡粪的质量, g/g; Δt 为干燥时间间隔, h。

2 干燥特性分析

2.1 温度对鸡粪干燥特性的影响

图 1 中的 a、b 分别是厚度为 4 cm 的鸡粪在风速 0.8 m/s、干燥温度为 35, 45, 55 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的干燥曲线和干燥速率曲线。从图 1a 可以看出, 干燥曲线呈现指数式衰减的趋势, 在同一粪层厚度和风速的条件下, 温度越高达到干燥平衡所需的时间越短。4 cm 鸡粪的干基含水率由 3.237 (湿基含水率 76.4%) 降至 0.43 (湿基含水率为 30.0%), 在该状态下大部分微生物失去活性, 易于存储和运输) 所用时间分别为: 35 $^{\circ}\text{C}$ 用时约 22 h, 45 $^{\circ}\text{C}$ 用时约 14 h, 55 $^{\circ}\text{C}$ 用时约 11 h。35 $^{\circ}\text{C}$ 用时约为 45 $^{\circ}\text{C}$ 的 1.6 倍, 55 $^{\circ}\text{C}$ 的 2 倍。达到干燥平衡所用的时间分别为: 35 $^{\circ}\text{C}$ 用 42 h、45 $^{\circ}\text{C}$ 用 30 h、55 $^{\circ}\text{C}$ 用 22 h。分析可以看出温度升高可以大幅度缩短干燥时间, 这是因为温度越高, 传热推动力越大, 干燥速率越快, 水分的去除率也就越快, 说明温度是影响鸡粪中低温干燥的主要因素。从图 1b 可以看出, 干燥速率曲线只有降速时段, 没有加速和恒速时段。这是因为整个鸡粪的干燥过程属于内部迁移控制, 即水分扩散速率决定干燥速率。另外, 当干基含水率降到一定程度时, 干燥速率曲线出现拐点, 因而整个干燥过程可以分为 2 个阶段, 即第 1 降速干燥阶段和第 2 降速干燥阶段, 35, 45, 55 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥速率曲线拐点分别出现在干燥过程中的第 16, 10, 4 小时, 干燥温度越高, 拐点出现的越早, 干燥速率降低幅度越大。第 1 降速干燥阶段 (拐点左侧), 自由水快速蒸发, 鸡粪浅层的自由水因迁移距离短而扩散阻力小, 能较快传递到鸡粪表面并蒸发, 随着内层水分迁移距离增加, 鸡粪干燥速率缓慢降低; 当干燥进入第 2 降速干燥阶段 (拐点右侧), 自由水大幅度减少, 鸡粪中的毛细管水、吸附水及结合水逐渐变成自由态后扩散至表层并蒸发, 由于毛细管水、吸附水及结合水需要较长时间才能变成自由态, 干燥后期鸡粪干燥速率迅速降低, 直至趋近于 0。同时可以看出, 温度越低, 第 2 阶段所需时间越长, 这是因为毛细管水、吸附水及结合水需要足够的热量才可以去除。

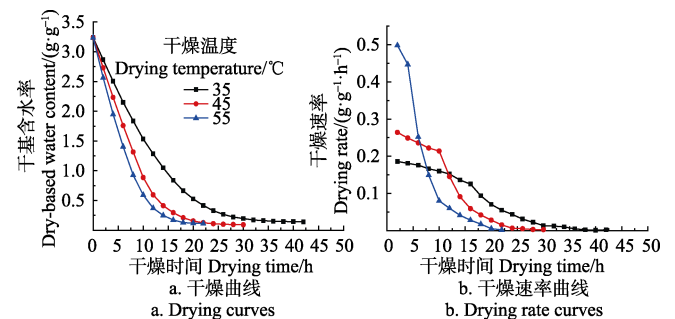


图 1 4 cm 厚鸡粪在风速 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下不同干燥温度的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.1 Drying curve and drying rate curves of 4 cm manure at different temperatures under air speed of $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

2.2 粪层厚度对鸡粪干燥特性的影响

图 2 中的 a、b 分别是厚度为 2、4、6 cm 的鸡粪在干

干燥温度 45 °C、风速 0.8 m/s 条件下的干燥曲线和干燥速率曲线。从图 2 中可以看出, 在同一干燥温度和风速的条件下, 粪层厚度越小达到干燥平衡所需的时间越短。鸡粪的干基含水率由 3.237 (湿基含水率 76.4%) 降至 0.43 (湿基含水率为 30.0%) 所用时间分别为: 2 cm 用时约 11 h, 4 cm 用时约 14 h, 6 cm 用时约 18 h。6 cm 用时约为 4 cm 的 1.3 倍, 2 cm 的 1.6 倍。达到干燥平衡所用的时间分别为: 2 cm 用时约 22 h, 4 cm 用时约 30 h, 6 cm 用时约 36 h。粪层厚度越大, 热质迁移距离越长, 扩散阻力越大, 干燥效率越低。不同粪层厚度下鸡粪的中低温干燥过程也分为 2 个降速阶段。2、4、6 cm 的干燥速率曲线拐点分别出现在干燥过程中的第 8、10、12 小时。粪层厚度越小, 干燥速率降低幅度越大。

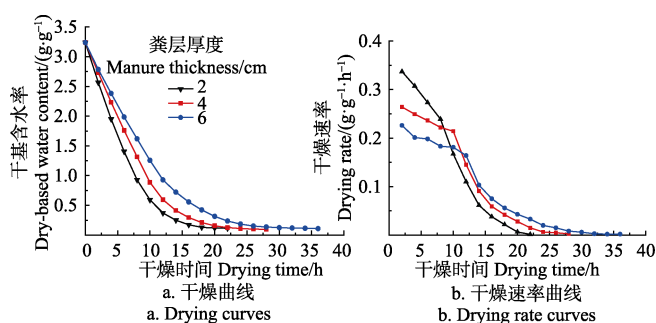


图2 不同厚度鸡粪在干燥温度 45 °C、风速 0.8 m·s⁻¹ 条件下的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.2 Drying curve and drying rate curves of manure at different thicknesses under air temperature of 45 °C and air speed of 0.8 m·s⁻¹

2.3 风速对鸡粪干燥特性的影响

图 3 中的 a、b 分别是厚度为 4 cm 的鸡粪在干燥温度为 45 °C、风速为 0.4, 0.8, 1.2 m/s 条件下的干燥曲线和干燥速率曲线。在同一温度和粪层厚度的条件下, 风速越大, 干燥时间越短。鸡粪的干基含水率由 3.237 g/g (湿基含水率 76.4%) 降至 0.43 g/g (湿基含水率为 30.0%) 所用时间分别为: 0.4 m/s 用时约 18 h, 0.8 m/s 用时约 14 h, 1.2 m/s 用时约 12 h。0.4 m/s 用时约为 0.8 m/s 的 1.3 倍, 1.2 m/s 的 1.5 倍。达到干燥平衡所用的时间分别为: 0.4 m/s 用时约 38 h, 0.8 m/s 用时约 30 h, 1.2 m/s 用时约 26 h。因此, 增加风速能有效提高鸡粪的干燥速率, 这是因为风速越大, 单位时间内流过鸡粪表面的空气越多, 流动边界层越薄, 降低了空气中的含湿量, 减小了鸡粪表面水蒸气向空气扩散的阻力, 因此水分蒸发越快, 干燥时间越短。另外从图 3a 可以看出, 在干燥中期, 随着风速的增加, 干燥曲线之间的间距减小, 这是因为风速增加到一定程度后, 已足以带走鸡粪蒸发的水分, 此时, 内部因素为影响干燥速率的主要因素, 再增加风速, 对干燥速率影响的作用减小。同样, 从图 3b 可以看出不同风速下鸡粪的中低温干燥过程也分为 2 个降速阶段。0.4, 0.8, 1.2 m/s 的干燥速率曲线拐点分别出现在干燥过程中的第 14, 10, 8 小时。风速越大, 干燥速率降低幅度越

大。干燥后期, 1.2 m/s 风速的干燥速率最低。

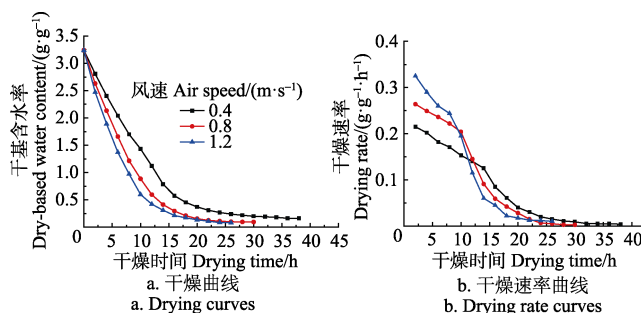


图3 4 cm 厚鸡粪在干燥温度 45 °C 下不同风速的干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.3 Drying curves and drying rate curves of 4 cm manure at different air speed under temperature of 45 °C

2.4 干燥模型分析

干燥是一个复杂的传热、传质过程, 干燥过程中内部水分的迁移过程涉及液相流动、毛细流动、蒸汽流动、液相扩散、蒸汽扩散等诸多传热传质现象^[22-23], 鸡粪的干燥过程可能包含上述多种现象, 因此其干燥过程不能用特定的理论来分析, 需要根据其失水规律建立干燥模型来预测干燥时间、干燥速率等参数。干燥模型的建立对于实际生产具有理论指导意义。

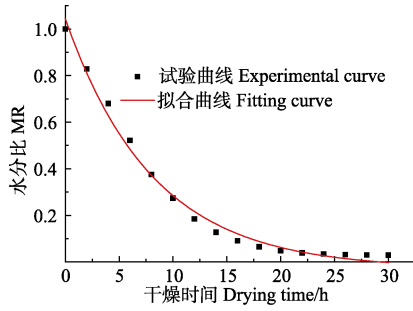
常用的薄层干燥模型 Page 模型, Lewis 模型, 单项扩散模型, Exponential 模型等^[24-25], 常用于模拟红枣、荔枝、核桃、紫薯、玉米、烟叶等农产品及污泥、皮革等高湿物料的薄层干燥。

在 Origin 中绘制不同试验组的 MR-*t* 曲线 (干燥速率低于 0.01 g/(g·h) 时, 以 MR 停止变化来计算), 并分别用上述模型进行拟合, 比较各个拟合曲线的残差平方和、相关系数等反应拟合度的参数后发现, Exponential 模型拟合出的曲线与原曲线的相关系数最高 (均高于 0.99, 拟合结果见表 1)。

由不同试验组的拟合方程 (表 1) 可判断 Exponential 模型方程中的 *A*、*K* 和 *C* 随干燥温度 (*T*, °C), 风速 (*V*, m/s) 和粪层厚度 (*L*, m) 的变化而发生变化, 即 Exponential 模型中的常数 *A*、*K* 和 *C* 是温度 *T*, 风速 *V* 和粪层厚 *L* 的函数。通过多元线性回归分析分别得到 *A*、*K*、*C* 与 *T*、*V* 和 *L* 的函数关系, 然后代入 Exponential 模型公式, 得到本研究的 Exponential 模型公式如下:

$$MR = (1.3836 - 0.0047T - 0.0801V - 0.37L) \exp[(-0.1723 + 0.324T + 0.0612V - 0.0709L)t] - 0.2583 + 0.0035T + 0.0375V + 0.2467L$$

为了验证所得 Exponential 模型公式的准确性, 随机选取试验条件为干燥温度 45 °C、风速 0.8 m/s、粪层厚度 4 cm 的试验组进行试验值和模拟值的比较。拟合曲线如图 4 所示, 试验曲线和模拟曲线的拟合度很高, 拟合曲线的决定系数 *R*² 为 0.989, 均方根误差 RMSE 为 0.027。因此, Exponential 模型能较好的模拟鸡粪的干燥过程。



注：试验条件为干燥温度 45 ℃，风速 0.8 m·s⁻¹，粪层厚度 4 cm。

Note: Experimental was conducted at temperature of 45 ℃, air speed of 0.8 m·s⁻¹ and manure thickness of 4 cm.

图 4 Exponential 模型验证

Fig.4 Verification of Exponential model

表 1 鸡粪干燥过程 Exponential 模型拟合结果

Table 1 Exponential model fitting results of poultry manure drying process

温度 Temperature/℃	风速 Air speed/ (m·s ⁻¹)	厚度 Thickness/ cm	拟合方程 Fitted equation	残差平方和 SSE	决定系数 R ²
35	0.8	2	MR=1.1458exp (0.0899t)-0.1227	6.468 9×10 ⁻⁴	0.993 9
		4	MR=1.1079exp (0.0721t)-0.0767	4.029 6×10 ⁻⁴	0.995 8
		6	MR=1.0755exp (0.0638t)-0.0559	1.126 3×10 ⁻⁴	0.998 7
45	0.8	2	MR=1.0977exp (0.1359t)-0.0691	8.186 8×10 ⁻⁴	0.992 8
		4	MR=1.1319exp (0.1064t)-0.0915	1.115 0×10 ⁻⁴	0.990 1
		6	MR=1.1068exp (0.0888t)-0.1227	6.552 6×10 ⁻⁴	0.993 6
55	0.8	2	MR=1.0127exp (0.2885t)-0.0284	8.315 4×10 ⁻⁴	0.993 8
		4	MR=1.0075exp (0.2206t)-0.0072	2.538 9×10 ⁻⁴	0.997 5
		6	MR=1.0295exp (0.1488t)-0.0120	1.305 0×10 ⁻⁴	0.998 7
45	0.4	4	MR=1.0873exp (0.0878t)-0.0498	8.573 1×10 ⁻⁴	0.991 2
	1.2	4	MR=1.0232exp (0.1490t)-0.0198	2.016 8×10 ⁻⁴	0.997 9

注：MR 为水分比， t 为干燥时间。

Note: MR is moisture ratio, t is drying time.

2.5 有效扩散系数

鸡粪干燥过程中 MR 值的变化符合 Exponential 模型说明鸡粪干燥主要是受水分扩散的影响。鸡粪中低温干燥过程主要为水分从内向外的扩散过程，可以通过费克第二定律描述鸡粪内部水分的扩散规律^[26]，其计算公式为：

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} D \right] \quad (5)$$

式中 D 为有效扩散系数（脱水能力），m²/h； n 为数据记录次数； L 为鸡粪样本的粪层厚度，m； t 为干燥时间，s。

对上式两端求对数，简化后得，

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4L^2} Dt \quad (6)$$

该方程为关于 t 和 $\ln(MR)$ 的一次方程。方程斜率为

$$-\frac{\pi^2}{4L^2} D; \text{ 方程截距为 } \ln \frac{8}{\pi^2}.$$

由式 (6) 可知，鸡粪干燥时间与粪层厚度的平方 (L^2) 成正比，与有效扩散系数 (D) 成反比，在鸡粪的干燥过程中，粪层越厚，所需的干燥时间越长。

分别绘制不同影响因子下鸡粪干燥过程中的 $\ln(MR)$ - t 曲线（图 5），并用一元线性方程对曲线进行拟合。拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.98，说明拟合情况较好， $\ln(MR)$ 与 t 大致符合线性的关系。

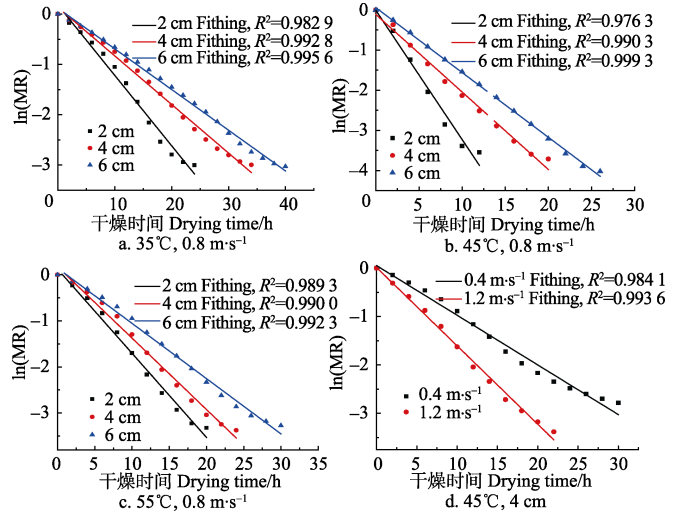


图 5 鸡粪干燥 $\ln(MR)$ - t 曲线及拟合曲线图

Fig.5 $\ln(MR)$ - t curves and fitted curves of poultry manure drying

从图 5 可进一步计算得出拟合直线的斜率（近似等于 $\ln(MR)$ - t 曲线的斜率）^[27]，再由公式(6)引导出的斜率公式计算出鸡粪的有效扩散系数。不同干燥温度、粪层厚度、风速下鸡粪的有效扩散系数如表 2 所示。由表 2 可知，鸡粪在不同因素条件下的有效扩散系数在 $2.25 \times 10^{-7} \sim 2.35 \times 10^{-6}$ m²/h 间，有效扩散系数随温度和风速的增大而增大。

表 2 鸡粪干燥过程中的有效扩散系数

Table 2 Effective diffusion coefficient during poultry manure drying process

温度 Temperature/℃	风速 Air speed/(m·s ⁻¹)	厚度 Thickness/cm	斜率 Slope	有效扩散系数 D/(m ² ·h ⁻¹)
35	0.8	2	-0.139	2.25×10 ⁻⁷
		4	-0.097	6.29×10 ⁻⁷
		6	-0.081	1.18×10 ⁻⁶
45	0.8	2	-0.183	2.96×10 ⁻⁷
		4	-0.155	1.01×10 ⁻⁶
		6	-0.120	1.75×10 ⁻⁶
55	0.8	2	-0.322	5.21×10 ⁻⁷
		4	-0.193	1.25×10 ⁻⁶
		6	-0.161	2.35×10 ⁻⁶
45	0.4	4	-0.103	6.68×10 ⁻⁷
	1.2	4	-0.162	1.05×10 ⁻⁶

3 正交试验结果分析

为了优化鸡粪中低温干燥的工艺参数，在上述单因

素试验结果的基础上, 设计了三因素三水平的正交试验, 分析干燥温度、粪层厚度、风速 3 个影响因素的主次关系。试验结果以干燥效率为评价指标, 干燥效率不同于干燥速率, 它是指干燥时间与干燥过程中去除水分质量的比值, 单位为 h/g。

试验结果如表 3 所示, 可以看出温度因子影响下的 k 值极差最大, 粪层厚度其次, 风速最小。因此, 影响因素的主次为: 干燥温度>粪层厚度>风速。干燥效率最高的干燥工艺为: $T3L3V3$, 即干燥温度 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粪层厚度 6 cm , 风速 1.2 m/s 。验证试验表明该工艺下鸡粪的干燥效率为 0.47 h/g 。因此, 鸡粪在中低温干燥时应尽可能保持较高的温度, 粪层较厚的时候, 可通过提高风速增加鸡粪的干燥效率。同时, 风速也非越大越好, 需找到粪层厚度和风速的最佳耦合值, 因为风速过大不仅会增加能耗, 还会增加氨气的排放, 这在接下来的相关试验中会做进一步研究。

表 3 正交试验结果与分析
Table 3 Results and analysis of orthogonal tests

试验 编号 Test No.	干燥 温度 Temp- erature $T/^{\circ}\text{C}$	厚度 Thick- ness L/cm	风速 Air speed $V/$ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	时间 Time t/h	鸡粪质量 Manure weight/g		去除水 分质量 Removed moisture/ g	干燥效率 Drying effectiv- eness/ $(\text{h}\cdot\text{g}^{-1})$
					鲜鸡粪 Initial	干鸡粪 Final		
1	1 (35)	1 (2)	1 (0.4)	36	25.35	6.36	18.99	1.90
2	1 (35)	2 (4)	2 (0.8)	42	49.54	13.35	36.19	1.16
3	1 (35)	3 (6)	3 (1.2)	50	72.76	20.37	52.39	0.95
4	2 (45)	1 (2)	2 (0.8)	22	26.19	6.08	20.11	1.09
5	2 (45)	2 (4)	3 (1.2)	28	50.55	12.17	38.38	0.73
6	2 (45)	3 (6)	1 (0.4)	40	78.03	19.03	59.00	0.68
7	3 (55)	1 (2)	3 (1.2)	14	24.07	6.19	17.88	0.78
8	3 (55)	2 (4)	1 (0.4)	24	49.15	12.73	36.42	0.66
9	3 (55)	3 (6)	2 (0.8)	28	75.14	19.91	55.23	0.51
k_1	1.34	1.26	1.08					
k_2	0.83	0.85	0.92					
k_3	0.65	0.71	0.82					
极差 R	0.69	0.55	0.26					

因素主次: $T>L>V$
干燥效率最高工艺 $T3L3V3$

4 结 论

1) 鸡粪的中低温干燥过程由 2 个降速阶段组成, 即第 1 降速阶段和第 2 降速阶段, 且第 2 降速阶段的干燥速率相对于第 1 降速阶段下降的更快。干燥温度越高, 粪层厚度越小, 风速越大, 干燥速率曲线出现拐点的时间越早, 达到干燥平衡所用的时间越短。在干燥过程的中后期, 风速对干燥速率的影响较小。

2) Exponential 模型能较好的模拟鸡粪的干燥过程, 在中低温条件下 $2\sim 6\text{ cm}$ 粪层厚度鸡粪的有效扩散系数为 $2.25\times 10^{-7}\sim 2.35\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{h}$, 有效扩散系数随温度和风速的增大而增大。

3) 采用正交试验得到干燥效率最高的工艺为: 干燥温度 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 粪层厚度 6 cm , 风速 1.2 m/s , 该工艺下鸡粪的干燥效率为 0.47 h/g 。极差分析得到影响鸡粪干燥因素

的主次为: 干燥温度>粪层厚度>风速。

[参 考 文 献]

- [1] 廖新梯, 吴银宝, 李有建. 我国蛋鸡粪处理主要工艺分析[J]. 中国家禽, 2010, 32(21): 37—39.
Liao Xindi, Wu Yinbao, Li Youjian. The main technologic analysis of poultry manure treatment in our country[J]. China Poultry, 2010, 32(21): 37—39. (in Chinese with English abstract)
- [2] 车立军, 毛文智, 石春军, 等. 浅谈鸡粪干燥的必要性与可行性[J]. 畜牧兽医科技信息, 2012(10): 22—23.
Che Lijun, Mao Wenzhi, Shi Chunjun, et al. Introduction to the necessity and feasibility of chicken manure drying[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2012(10): 22—23. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈斌. 降低鸡粪含水率的两项措施[J]. 当代畜牧, 1991(2): 49—50.
Chen Bin. Two measures of reducing moisture content of chicken manure[J]. Contemporary Animal Husbandry, 1991(2): 49—50. (in Chinese with English abstract)
- [4] Winkel A, Mosquera J, Aarnink A J A, et al. Evaluation of manure drying tunnels to serve as dust filters in the exhaust of laying hen houses: Emissions of particulate matter, ammonia, and odour [J]. Biosystems Engineering, 2017, 16(2): 81—98.
- [5] Ghaly. Drying poultry manure for pollution potential reduction and production of organic fertilizer[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2013, 9(2): 88—102.
- [6] 费辉盈, 常志州, 王世梅, 等. 畜禽粪便水分特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 13(9): 599—603.
Fei Huiying, Chang Zhizhou, Wang Shimei, et al. Characterization of moisture in three livestock manures[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 13(9): 599—603. (in Chinese with English abstract)
- [7] Stanish M A, Schajer G S, Kayihan F. A mathematical model of drying for hygroscopic porous media[J]. Aiche Journal, 2010, 32(8): 1301—1311.
- [8] Bonneau P, Puiggali J R. Influence of heartwood-sapwood proportions on the drying kinetics of a board[J]. Wood Science & Technology, 1993, 28(1): 67—85.
- [9] Ghaly A E, MacDonald K N. Kinetics of thin layer drying of poultry manure[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2012, 8(2): 128—142.
- [10] Aboltins A, Kic P. Forced convection in drying of poultry manure[J]. Agronomy Research, 2015, 13(1): 215—222.
- [11] Kic P, Aboltins A. Convective drying of poultry manure by different air speeds[J]. Engineering for Rural Development-International Scientific Con, 2013(5): 23—24.
- [12] Liska R, Kic P. Drying process of poultry manure at various temperatures[C]. Trends in Agricultural Engineering, 2010.
- [13] 赵广播, 阮根健, 朱群益, 等. 鸡粪干燥特性及其在鸡粪干燥设备设计中的应用[J]. 环境保护, 1993(4): 37—39.
Zhao Guangbo, Ruan Genjian, Zhu Qunyi, et al. The drying characteristics of chicken manure and its application in the design of chicken manure drying equipment[J]. Environmental Protection, 1993(4): 37—39. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩捷, 尚允华, 国清金, 等. 鸡粪快速烘干工艺及成套设备[J]. 农业工程学报, 1993, 9(1): 182—188.
Han Jie, Shang Yunhua, Guo Qingjin, et al. The High-speed drying technologies and its complete sets of equipment for chicken maure[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1993, 9(1): 182—188. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bux M. Resent experience with solar-assisted Timber[C]// Drying Under Moderate Climate 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Romania, 2003.
- [16] 郝文刚, 陆一锋, 赖艳华, 等. 开放式太阳能物料干燥热湿迁移模型的构建及验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 301—307.
Hao Wengang, Lu Yifeng, Lai Yanhua, et al. Modeling of materials heat and moisture transfer in open sun drying and experimental validation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 301—307. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张璧光, 伊松林. 我国太阳能干燥现状及在热利用中应有的地位[J]. 干燥技术与设备, 2012(1): 32—37.
Zhang Biguang, Yi Songlin. The present state of the solar drying in China and the status which it should have in thermal application[J]. Drying Technology & Equipment, 2012(1): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [18] Schonherr M. Modern drying technology[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(10): 1815—1816.
- [19] Vijayavenkataraman S, Iniyar S, Goic R. A review of solar drying technologies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2652—2670.
- [20] Bennamoun L. Solar drying of wastewater sludge: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 1061—1073.
- [21] Belessiotis V, Delyannis E. Solar drying[J]. Solar Energy, 2011, 85(8): 1665—1691.
- [22] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [23] 李长友, 赵懿琨, 马兴灶. 荔枝干燥热湿特性模型解析与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 289—298.
Li Changyou, Zhao Yikun, Ma Xingzao. Model analytical and verification of heat and moisture characteristics in litchi drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 289—298. (in Chinese with English abstract)
- [24] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] Kudra T, Mujumdar A S. Advanced Drying Technologies [M]. 2nd Ed. Advanced Drying Technologies, 2009.
- [26] 张绪坤, 苏志伟, 王学成, 等. 污泥过热蒸汽与热风薄层干燥的湿分扩散系数和活化能分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 226—235.
Zhang Xukun, Su Zhiwei, Wang Xuecheng, et al. Analysis of moisture diffusion and activation energy in superheated steam and hot air sludge thin layer drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 226—235. (in Chinese with English abstract)
- [27] Ghaly A E, Macdonald K N. Kinetics of thin layer drying of poultry manure[J]. American Journal of Biochemistry & Biotechnology, 2012, 8(2): 128—142.

Middle-low temperature drying dynamic characteristics for poultry manure and its parameter optimization

Li Xuanyang^{1,2}, Li Baoming^{1,2,3*}, Zheng Weichao^{1,2,3}, Wei Yongxiang^{1,2}, Zhang Zhi^{1,2}

(1. College of Water Recourses & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Lab of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China;

3. Beijing Engineering Research Center for Livestock and Poultry Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: The poultry industry in China is developing. The estimated flock in 2017 was over 1.4 billion hens with a yearly manure output of 56 million tons. Such a large amount of poultry manure has a tremendous pressure on environment because of the associated air, water and soil pollution. Environmental and health problems such as odor and pathogens can be eliminated by decreasing the moisture content of poultry manure. Thermal drying has been proven to be an effective method to remove moisture. Drying at middle-low temperature can not only save energy but also reduce the emission of ammonia compared with traditional drying method at high temperature. Middle-low temperature heat sources, such as solar energy and warm weather in-house, can be used to dry poultry manure. Furthermore, dried manure can be utilized as a raw material to produce organic fertilizer. In order to study the drying characteristics of poultry manure at middle-low temperature, drying experiments of poultry manure were carried out in a temperature-controlled drying oven. The effects of drying temperature, manure thickness and air speed on manure moisture ratio and drying rate were examined. After that, common drying models were applied to simulate the drying process. The optimization of the middle-low temperature drying parameters was also performed by orthogonal test. The result showed that the middle-low temperature drying process of poultry manure could be divided into 2 falling rate periods: The first falling rate period and the second falling rate period. The removed water in the first stage was mainly free water, the removed water in the second stage was mainly the capillary water, adsorption water and bound water, and the drying rate in the second stage was lower than that in the first stage. With the increasing of temperature, the decreasing of thickness, and the increasing of air speed, the appearance of inflection point became earlier and the drying time became shorter. Exponential model was more suitable for describing the poultry manure drying process at middle-low temperature and the effective diffusion coefficients were $2.25 \times 10^{-7} \sim 2.35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$. In terms of drying effectiveness, the most efficient technological parameters were presented as follows: Drying temperature of 55°C , manure thickness of 6 cm, and air speed of 1.2 m/s, and the drying effectiveness under this condition was 0.47 h/g. The order of the factors for increasing drying effectiveness was drying temperature > thickness > air speed.

Keywords: drying; manures; models; middle-low temperature; exponential model; effective diffusion coefficient