

# 基于 LF-NMR 分析蚕蛹在不同干燥过程中的水分迁移规律

吴钊龙<sup>1,2</sup>, 林芳<sup>1,2</sup>, 唐小闲<sup>1</sup>, 陈振林<sup>1\*</sup>

(1. 贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西贺州 542899) (2. 广西科学院, 国家非粮生物质能源工程技术研究中心, 非粮生物质酶解国家重点实验室, 广西生物炼制重点实验室, 广西南宁 530007)

**摘要:** 该研究采用低场核磁共振技术 (LF-NMR) 结合干燥曲线, 探讨了热泵干燥和变温压差膨化干燥对蚕蛹水分迁移变化规律的影响, 揭示两种不同干燥过程中蚕蛹内部的水分状态、分布、含量的情况。结果表明, 变温压差膨化干燥 (EPD) 在干燥过程中水分下降较快, 其干燥速率也快于热泵干燥 (HPD)。新鲜蚕蛹水分可分为结合水  $T_{21}$  (0~2 ms)、不易流动水  $T_{22}$  (2~100 ms) 和自由水  $T_{23}$  (100~1000 ms) 三部分, 对应 3 个峰的峰面积分别为: 49.531、661.651、1730.075, 峰面积占比分别为 2.03%、27.10%、70.87%。蚕蛹随着干燥时间的延长, EPD 和 HPD 2 种干燥方式下  $T_2$  弛豫时间均呈现出相同的变化趋势, 一方面是峰位置向左迁移, 另一方面是总峰面积  $A_{\Sigma}$  不断减小, 水分的主要状态逐步变成不易流动水和结合水。EPD 和 HPD 2 种干燥方式下干基含水量  $x$  和总峰面积  $A_{\Sigma}$  之间的关系方程分别为  $A_{\Sigma}=702.01x+173.92$  ( $R^2=0.9997$ ) 及  $A_{\Sigma}=695.94x+229.24$  ( $R^2=0.9968$ ), 两者均呈显著的线性关系 ( $p<0.05$ ), 其中 EPD 拟合度更好, 但 HPD 过程的氢质子密度分布相对均匀。综合考虑 EPD 能更好描述蚕蛹干燥过程中水分迁移规律。

**关键词:** 蚕蛹; 热泵干燥; 变温压差膨化干燥; 水分; 低场核磁

文章编号: 1673-9078(2022)03-237-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0573

## Analysis of Moisture Migration Law of Silkworm Pupa during Different Drying Processes by LF-NMR

WU Zhaolong<sup>1,2</sup>, LIN Fang<sup>1,2</sup>, TANG Xiaoxian<sup>1</sup>, CHEN Zhenlin<sup>1\*</sup>

(1. Research Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, China)

(2. National Engineering Research Center for Non-Food Biorefinery, State Key Laboratory of Non-Food Biomass and Enzyme Technology, Guangxi Key Laboratory of Bio-refinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** In this study, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) technique combined with drying curve was used to investigate the influence of heat pump drying and variable temperature differential pressure puffing drying (EPD) on the moisture migration of silkworm pupa, to reveal the state, distribution, and content of moisture inside silkworm pupa during two different drying processes. The results showed that EPD led to a more rapid moisture decrease during the drying process, and its drying rate was also higher than that of the heat pump drying (HPD). The moisture of fresh silkworm pupa could be divided into three parts: bound water  $T_{21}$  (0~2 ms), non-flowing water  $T_{22}$  (2~100 ms) and free water  $T_{23}$  (100~1000 ms), with their corresponding peak areas of the three peaks as 49.531, 661.651, and 1730.075, respectively, and peak area percentages as 2.03%, 27.10%, and 70.87%, respectively. With the extension of the drying time for the silkworm pupa, the  $T_2$  relaxation time of the EPD and HPD showed the same changing trend. On one hand, the peak position shifted to the left, and on the other hand, the total peak area  $A$  kept decreasing. The main state of moisture gradually became non-flowing water and bound water. The relationship equations

引文格式:

吴钊龙, 林芳, 唐小闲, 等. 基于 LF-NMR 分析蚕蛹在不同干燥过程中的水分迁移规律[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 237-243, +96

WU Zhaolong, LIN Fang, TANG Xiaoxian, et al. Analysis of moisture migration law of silkworm pupa during different drying processes by LF-NMR [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 237-243, +96

收稿日期: 2021-05-28

基金项目: 广西壮族自治区科技厅现代食品加工新技术研究岗位创新人才培养示范基地建设项目 (桂科 AD17195088)

作者简介: 吴钊龙 (1995-), 男, 研究实习生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: wuzhaolong@gxas.cn

通讯作者: 陈振林 (1963-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 379140988@qq.com

between the moisture content on dry basis ( $x$ ) and the total peak area  $A$  under the two drying methods, EPD and HPD, were  $A=702.01x+173.92$  ( $R^2=0.9997$ ) and  $A=695.94x+229.24$  ( $R^2=0.9968$ ), respectively. Both showed a significant linear relationship ( $p<0.05$ ), with EPD showing a better fit, but HPD having a relatively uniform distribution of hydrogen proton density. Comprehensive evaluation revealed that EPD can describe better the water migration law during the drying process of silkworm pupa.

**Key words:** silkworm pupa; heat pump drying; explosion puffing drying; moisture; low-field nuclear magnetic resonance

蚕蛹 (Silkworm Pupa) 是 2004 年卫生部批准的作为普通食品管理的食品新资源中唯一的昆虫类食品, 富含大量的蛋白质、脂肪酸、甲壳素、糖类和丰富的微量元素等<sup>[1,2]</sup>。蚕蛹不仅仅是一种具有较高营养价值的美食, 也是一种具有较强功能活性的中药<sup>[3,4]</sup>。目前, 我国的蚕蛹大多进行粗加工后当饲料和肥料处理, 在其他应用领域的开发利用较少, 且手段和途径有限, 产品种类不多, 限制了蚕桑产业收入增长<sup>[5]</sup>。将蚕蛹干燥加工成即食干制品, 可以降低其水分含量和水分活度, 延长贮藏期和提高其附加值, 是未来蚕蛹深加工发展的主要方向<sup>[6]</sup>。因此, 研究干燥过程中蚕蛹内水分迁移规律对干燥工艺和产品品质的提高具有重要意义。

物料水分含量与状态是影响物料干燥的关键因素, 物料中水分含量的多少以及其结合状态直接影响产品的外观、品质、组织结构和易腐烂程度<sup>[7]</sup>。但是常规测定水分方法存在测定时间长、测定结果不精准等问题, 并且只能测定总体的水分含量, 无法实时测定物料中水分的变化, 限制食品加工的进一步研究<sup>[7,8]</sup>。低场核磁共振技术 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 是一种无损快速的检测技术, 包括低场核磁共振波谱及氢质子核磁成像技术<sup>[9]</sup>, 可以通过横向弛豫时间  $T_2$  的变化实时跟踪样品干燥过程中水分状态变化情况, 能快速、直观地得到水分变化规律, 随着核磁技术的不断发展, LF-NMR 技术在农产品的干燥、贮藏、加工和质量评价等领域得到较为广泛的应用<sup>[10,11]</sup>。迄今, 未见有关 LF-NMR 应用于蚕蛹在干燥过程中水分迁移变化规律的研究报道。

本文以新鲜蚕蛹为对象, 采用低场核磁共振技术 (LF-NMR) 研究热泵干燥 (heat pump drying, HPD) 和变温压差膨化干燥 (explosion puffing drying, EPD) 两种干燥方式下蚕蛹的水分分布和迁移规律, 结合干燥特性曲线及干燥过程中内部水分状态等参数, 建立蚕蛹热泵干燥 (HPD) 和变温压差膨化干燥 (EPD) 过程干基含水量和总峰面积  $A_{\text{总}}$  之间的关系方程, 期为蚕蛹热泵干燥和变温压差膨化干燥提供理论参考依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 原料

新鲜蚕蛹, 蛋白质含量 20.67%, 初始干基含水量 3.24 g/g, 取自广西平乐国弘茧丝绸有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

WRH-100AB 型闭环除湿热泵干燥机, 正旭新能源设备科技有限公司; KAAE 型变温压差膨化干燥机, 江苏楷益智能科技有限公司; JJ1000 型电子天平, 常熟市双杰测试仪器厂; NMI20 型核磁共振成像分析仪, 苏州 (上海) 纽迈电子科技有限公司; PH-070A 型干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 原料处理

挑选大小均匀, 新鲜的蚕蛹, 采用热泵干燥和变温压差膨化干燥方式对其进行干燥。

#### 1.3.2 干燥方法

热泵干燥: 在恒定风速, 温度为 80 °C, 装载量为 15 kg/m<sup>2</sup>, 相对湿度为 25% 条件下进行干燥, 每隔 30 min 取样, 进行 LF-NMR 测定, 直至蚕蛹干基含水量降到 0.05 g/g 以下停止干燥。

变温压差膨化干燥: 将装载量为 15 kg/m<sup>2</sup> 的蚕蛹均匀平铺于变温压差膨化机组膨化罐的钢丝筛上, 关闭罐门, 打开蒸汽发生器, 待罐内温度 (膨化温度) 为 80 °C, 膨化压力达到 0.3 MPa 时保持 10 min (停滞时间), 打开泄压阀, 同时关闭蒸汽发生器, 打开冷凝水, 以抽空温度达到 80 °C (干燥温度), 真空罐真空度为 0.098 MPa, 每保持 30 min (干燥时间) 取一次样品, 进行 LF-NMR 测定, 直至蚕蛹干基含水量降到 0.05 g/g 以下停止干燥。

#### 1.3.3 干基含水量

蚕蛹干基含水量采用 GB 5009.3-2016 《食品中水分的测定》中规定的直接干燥法测定, 经测定, 蚕蛹初始干基含水量为 3.24 g/g。干燥过程中, 蚕蛹干基含水量根据式 (1) 计算:

$$M = \frac{m_t - m}{m} \quad (1)$$

式中:

$M$ —干燥到  $t$  时刻的蚕蛹干基含水量, g/g;

$m_t$ —干燥到  $t$  时刻的蚕蛹质量, g;

$m$ —绝干蚕蛹的质量, g<sup>[12]</sup>。

### 1.3.4 干燥速率

蚕蛹热泵干燥和变温压差膨化干燥过程的干燥速率按式 (2) 计算。

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:

DR—干燥速率, g/g·min;

$\Delta t$ —相邻 2 次测定的时间间隔, min;

$M_{t+\Delta t}$ —干燥至  $t+\Delta t$  时刻的蚕蛹干基含水量, g/g;

$M_t$ —干燥至  $t$  时刻的蚕蛹干基含水量, g/g<sup>[13]</sup>。

### 1.3.5 $T_2$ 的采集及反演

参照盘喻颜等<sup>[7]</sup>的方法并作适当修改, 每隔 30 min 取出样品称量后, 置于核磁管中并放入磁体线圈中心, 先用 FID 序列获得样品的中心频率, 再用 CPMG 脉冲序列测样品中的横向弛豫时间  $T_2$ , 每份样品重复采集三次信号, 并将结果取平均值。序列参数设置为: 主频 SF1=18 MHz、偏移频率  $O_1=418100.47$  kHz、 $90^\circ$  脉冲时间 P90=10  $\mu$ s、 $180^\circ$  脉冲时间 P180=20  $\mu$ s、采样点数 TD=240008、累加次数 4 次、回波时间 TE=600 ms、回波次数=4000。

### 1.3.6 NMR 成像实验及参数设定

参照盘喻颜等<sup>[7]</sup>的方法并作适当修改。将样品放入磁体线圈中心进行信号采集, 用核磁共振成像软件中的 SE 序列来获得可视化信息表, 每隔 20 min 进行一次 NMR 成像, 成像参数设置为: 主频 SF1=18 MHz、偏移频率  $O_1=159.609$  131 kHz、采样点数 TD=256、采样频率 SW=20 kHz、采样时间 DW=50  $\mu$ s、信号采样总时间 ACQ=12.8 ms、接收机死时间 DT2=1.4 ms、模拟增益 RG1=20 dB、数字增益 DRG1=3 dB、选层方向 GsliceY=1、相位编码方向 GphaseZ=1、频率编码方向 GreadX=1、 $90^\circ$  脉冲宽度 P1=1200  $\mu$ s、 $180^\circ$  脉冲宽度 P2=1200  $\mu$ s、 $90^\circ$  脉冲幅度 RFA1=3%、 $180^\circ$  脉冲幅度 RFA2=6%、射频脉冲形状 RFSH1 为 5sinc256、重复采样次数 NS=4、累加次数 RP1count=4、相位编码步数 RP2count=128。

为保证数据的高精准性, 对所得的峰面积和横向弛豫时间进行标准化处理, 得到每单位质量样品对应的峰面积和横向弛豫时间, 峰面积  $A_2$  和横向弛豫时间  $T_2$  标准化处理可分别表示为式 (3) 和式 (4):

$$A_2 = \frac{A_t}{M_2} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{T_t}{M_2} \quad (4)$$

式中:

$A_t$  和  $T_t$ —分别为  $t$  时刻反演后的峰面积和横向弛豫时间, ms;

$A_2$  和  $T_2$ —分别为  $t$  时刻标准化处理后的峰面积和横向弛豫时间, ms;

$M_2$ —对应蚕蛹的质量, g<sup>[7]</sup>。

## 1.4 数据分析

用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行方差分析处理, 采用 Duncan 法进行多重比较, 显著性水平为  $p < 0.05$ , Origin 8.0 绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干燥方式对蚕蛹水分迁移规律的影响

#### 2.1.1 干燥方式对干燥特性的影响

在“1.3.2 干燥方法”规定的条件下, 分别对蚕蛹进行热泵干燥和变温压差膨化干燥, 干燥过程的干燥曲线和干燥速率曲线见图 1a 和 1b。

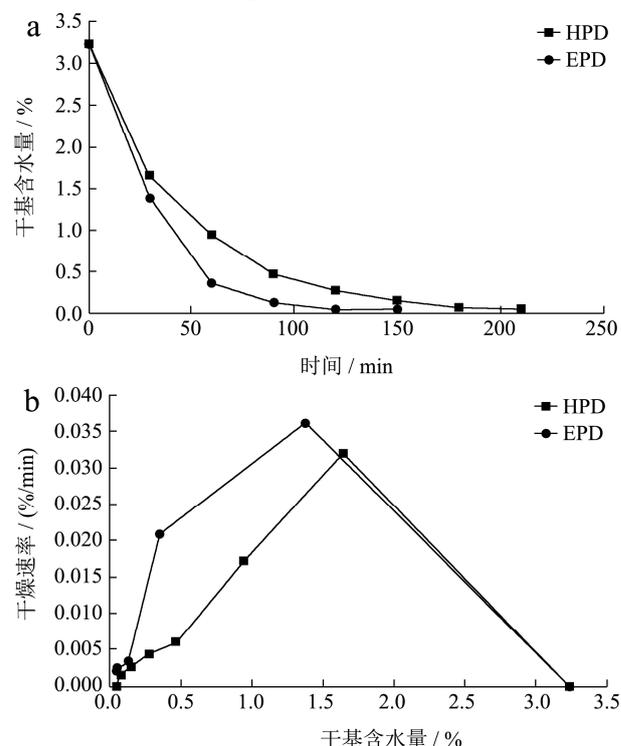


图 1 不同干燥方式下的干燥曲线 (a) 和干燥速率曲线 (b)

Fig.1 Drying curve (a) and drying rate curve (b) under different drying methods

由图 1a 可知, 从蚕蛹的干基含水量变化趋势看, 随着干燥时间的延长, EPD 和 HPD 两种干燥方

式的蚕蛹干基含水量均持续降低,其中 EPD 蚕蛹干基含水量下降更明显,水分迁移更快。在 EPD 和 HPD 两种干燥方式下,蚕蛹干基含水量由 3.24 g/g 降至 0.05 g/g 以下所需时间分别为 160 和 280 min,时间相差 1.75 倍。

由图 1b 可知,EPD 和 HPD 两种干燥方式均有增速、降速两个阶段,在整个干燥过程中以降速干燥为主,干基含水量较高时,干燥速率大,随着干基含水量的降低,干燥速率不断减小。在降速阶段,EPD 干燥的干燥速率明显高于 HPD 干燥的干燥速率,这与吴钊龙等<sup>[4]</sup>研究不同干燥方式干燥蚕蛹的结果一致。主要是因为 EPD 干燥是利用相变和气体的热压效应原理,使蚕蛹内部的水分迅速升温汽化,干燥速度加快<sup>[14]</sup>。

### 2.1.2 新鲜蚕蛹的 $T_2$ 反演谱随弛豫时间的变化

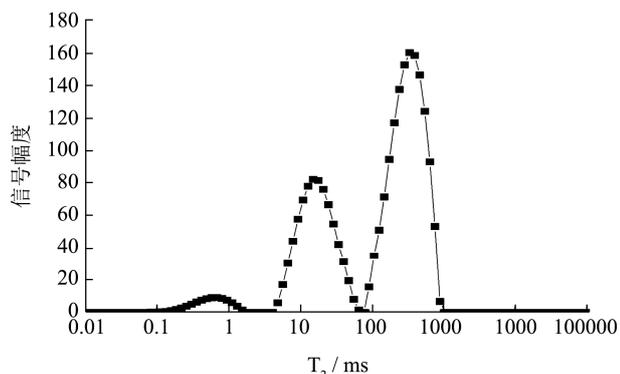


图2 新鲜蚕蛹的  $T_2$  反演谱

Fig.2  $T_2$  inversion spectrum of fresh silkworm pupa

如图 2 所示,反演后的新鲜蚕蛹的 NMR  $T_2$  反演图谱有 3 个波峰,表明新鲜蚕蛹内部存在 3 种不同水分状态,3 种不同水分状态在  $T_2$  反演图谱中对应的横向弛豫时间  $T_2$  范围分别为结合水  $T_{21}$  (0~2 ms)、不易流动水  $T_{22}$  (2~100 ms)、自由水  $T_{23}$  (100~1000 ms)<sup>[15]</sup>,对应 3 个峰的峰面积分别为: 49.531、661.651、1730.075,峰面积占比分别为 2.03%、27.10%、70.87%。由此可见,新鲜蚕蛹中 70% 以上的水都是自由流动的水,只有不到 3% 的水与蚕蛹中的大分子进行紧密的结合。

### 2.1.3 干燥方式对低场核磁共振图谱的影响

蚕蛹热泵干燥和变温压差膨化干燥过程的核磁共振波谱分别图 3a 和 3b。

$T_2$  与信号强度的关系曲线可以间接反映出蚕蛹中水分的含量、状态和移动方式,  $T_2$  越大,水分自由度越高,越容易排出;  $T_2$  越小,水分与其他非水组分的结合越紧,水分自由度越小,越不容易排出;如图 3 所示,随着干燥时间延长,EPD 和 HPD 两种干燥方

式的干燥过程中水分变化呈现出相似的趋势,均发生了不同程度的迁移。一是峰位置逐渐左移,二是峰面积逐渐减小,即自由水含量不断减少,同时水分与非水组分的结合程度越来越紧密,在干燥的前期过程中主要散失的是自由水,这与蔡路昀等<sup>[16]</sup>研究不同干燥方式对沙丁鱼水分迁移规律影响的结果一致。

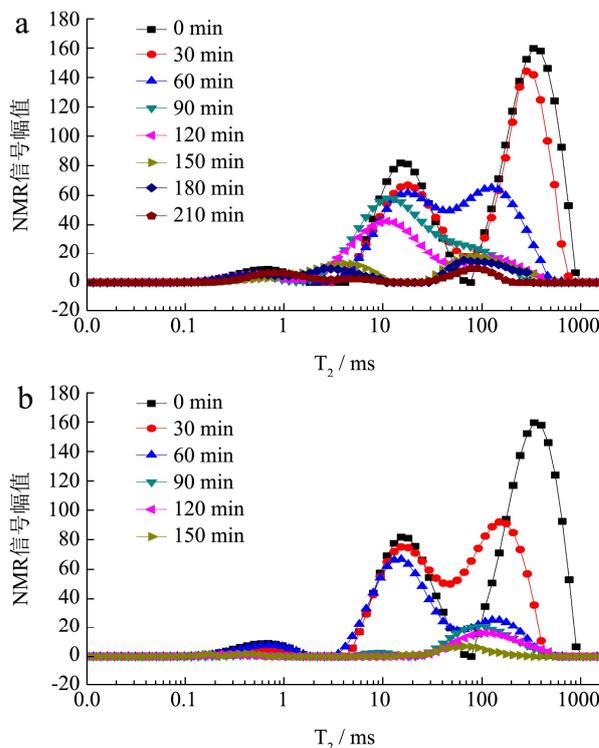


图3 不同干燥方式下的核磁共振波谱

Fig.3 NMR spectra under different drying methods

注: (a) HPD drying; (b) EPD drying. 下同。

### 2.1.4 干燥方式对蚕蛹核磁信号幅度变化的影响

HPD 与 EPD 两种干燥方式对蚕蛹干燥过程中横向弛豫时间  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  和峰面积  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$ 、 $A_{总}$  的影响结果见表 1。

横向弛豫时间  $T_2$  反映了样品内部氢质子的存在状态和所处的化学环境,与氢质子所受的束缚力有关,氢质子受束缚力越小,水分越易脱去,  $T_2$  弛豫时间越长,在  $T_2$  图谱上峰位置越靠右;反之氢质子受束缚力越大,水分越难脱去,  $T_2$  弛豫时间越短,在  $T_2$  图谱上峰位置越靠左<sup>[17]</sup>。

由表 1 可知,蚕蛹在 EPD 和 HPD 两种干燥方式中,结合水横向弛豫时间  $T_{21}$ 、不易流动水横向弛豫时间  $T_{22}$ 、自由水横向弛豫时间  $T_{23}$  均随着干燥时间的延长呈下降趋势。不同干燥时间  $T_2$  反演谱中各个峰面积的大小可以表征含水量的多少 ( $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  分别为峰  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$  的峰面积,  $A_{总}$  为 3 个峰的总峰面积),新鲜蚕蛹中  $A_{23}$  信号量大,占据了总水分信号量

A<sub>总</sub>的主体。随着干燥时间的延长, EPD 和 HPD 两种干燥过程中总峰面积 A<sub>总</sub>均逐渐减小, 结合水峰面积 A<sub>21</sub>和不易流动水 A<sub>22</sub>均呈先上升后下降的趋势, 自由水峰面积 A<sub>23</sub>均呈下降趋势, 且均在蚕蛹干基含水量为 0.12 g/g 左右时, 自由水的信号完全消失, 同时不易流动水的波峰明显左移。可见干燥破坏了蚕蛹内部细胞结构, 对蚕蛹水分状态的变化起明显作用, 在相

同干燥时间下, EPD 干燥的总峰面积低于 HPD 干燥, 说明此干燥时间下 EPD 干燥的水分要低于热泵干燥, 这与干燥曲线的变化趋势相一致, 表明 EPD 干燥能够有效增加样品内外水分梯度, 加快内部水分由内往外迁移<sup>[15]</sup>。EPD 和 HPD 两种干燥最终阶段, 剩余总水分信号均以少量结合水和不易流动水为主, 蚕蛹干制品达到安全水分, 可实现安全储藏。

表 1 蚕蛹的水分分布在不同干燥方式下随干燥时间的变化

Table 1 The moisture distribution of silkworm pupa changes with the drying time under different drying methods

干燥方式	干燥时间/min	T <sub>21</sub> /ms	T <sub>22</sub> /ms	T <sub>23</sub> /ms	A <sub>21</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>23</sub>	A <sub>总</sub>
EPD	0	0.031 <sup>a</sup>	77.426 <sup>f</sup>	890.215 <sup>f</sup>	49.531 <sup>c</sup>	661.651 <sup>e</sup>	1730.075 <sup>d</sup>	2441.257 <sup>f</sup>
	30	0.031 <sup>a</sup>	47.508 <sup>e</sup>	756.463 <sup>e</sup>	70.960 <sup>e</sup>	674.308 <sup>f</sup>	407.679 <sup>c</sup>	1152.947 <sup>e</sup>
	60	0.031 <sup>a</sup>	34.305 <sup>d</sup>	642.807 <sup>d</sup>	75.491 <sup>f</sup>	247.090 <sup>d</sup>	85.393 <sup>b</sup>	407.974 <sup>d</sup>
	90	0.027 <sup>a</sup>	21.049 <sup>c</sup>	546.228 <sup>c</sup>	69.788 <sup>d</sup>	210.280 <sup>c</sup>	5.651 <sup>a</sup>	285.719 <sup>c</sup>
	120	0.027 <sup>a</sup>	17.887 <sup>b</sup>	464.159 <sup>b</sup>	30.544 <sup>b</sup>	186.413 <sup>b</sup>	-	216.957 <sup>b</sup>
	150	0.023 <sup>a</sup>	15.199 <sup>a</sup>	335.160 <sup>a</sup>	27.159 <sup>a</sup>	160.885 <sup>a</sup>	-	188.044 <sup>a</sup>
HPD	0	0.031 <sup>a</sup>	77.426 <sup>h</sup>	890.215 <sup>h</sup>	49.531 <sup>f</sup>	661.651 <sup>g</sup>	1730.075 <sup>f</sup>	2441.257 <sup>h</sup>
	30	0.027 <sup>a</sup>	65.793 <sup>g</sup>	756.463 <sup>g</sup>	57.104 <sup>h</sup>	668.916 <sup>h</sup>	682.483 <sup>e</sup>	1408.503 <sup>g</sup>
	60	0.023 <sup>a</sup>	47.508 <sup>f</sup>	642.807 <sup>f</sup>	50.010 <sup>g</sup>	436.753 <sup>f</sup>	468.435 <sup>d</sup>	955.198 <sup>f</sup>
	90	0.023 <sup>a</sup>	40.370 <sup>e</sup>	464.159 <sup>e</sup>	47.701 <sup>e</sup>	376.023 <sup>e</sup>	162.587 <sup>c</sup>	586.311 <sup>e</sup>
	120	0.023 <sup>a</sup>	34.305 <sup>d</sup>	394.421 <sup>d</sup>	40.368 <sup>d</sup>	335.610 <sup>d</sup>	47.080 <sup>b</sup>	423.058 <sup>d</sup>
	150	0.019 <sup>a</sup>	29.151 <sup>c</sup>	335.160 <sup>c</sup>	37.732 <sup>c</sup>	305.980 <sup>c</sup>	0.005 <sup>a</sup>	343.717 <sup>c</sup>
	180	0.019 <sup>a</sup>	24.771 <sup>b</sup>	284.804 <sup>b</sup>	32.652 <sup>b</sup>	205.062 <sup>b</sup>	-	237.714 <sup>b</sup>
210	0.019 <sup>a</sup>	21.049 <sup>a</sup>	242.013 <sup>a</sup>	28.411 <sup>a</sup>	177.379 <sup>a</sup>	-	205.790 <sup>a</sup>	

注: 同干燥方式同列不同小写字母表示差异显著 (p<0.05)。

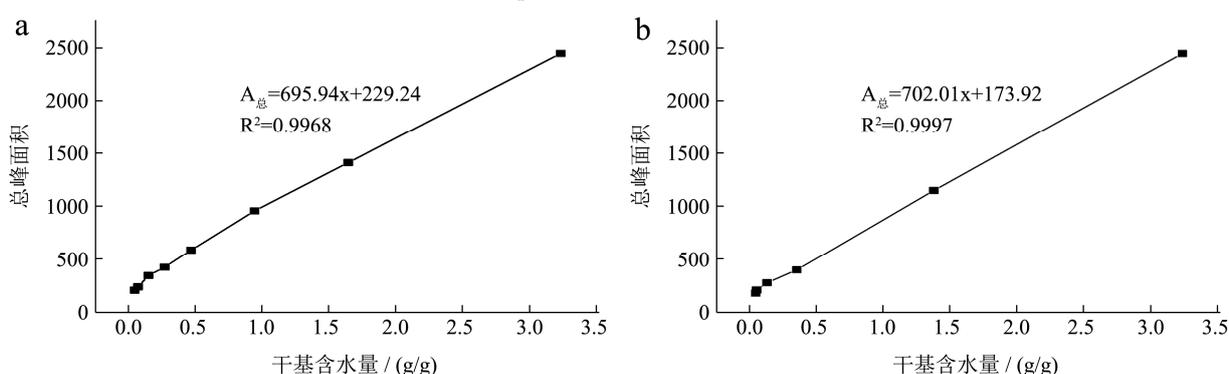


图 4 蚕蛹 EPD 和 HPD 干燥过程中干基含水量和总峰面积的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of dry basis moisture content and total peak area during the drying process of silkworm pupa EPD and HPD

## 2.2 蚕蛹干基含水量和 T<sub>2</sub> 反演谱总峰面积相关性分析

总峰面积表示样品中的相对总含水量, 通过定标曲线可以定量得到样品中总含水量和不同状态水分的含量<sup>[18]</sup>。为了研究蚕蛹 EPD 和 HPD 过程中 T<sub>2</sub> 反演谱总峰面积随干基含水量变化的规律, 建立了蚕蛹 EPD 和 HPD 过程 A<sub>2</sub> 与干燥过程中的实际干基含水量的关

系方程见图 4。

由图 4 可知, EPD 干燥的线性拟合方程为 A<sub>总</sub> = 702.01x + 173.92 (R<sup>2</sup> = 0.9997), HPD 干燥的线性拟合方程为 A<sub>总</sub> = 695.94x + 229.24 (R<sup>2</sup> = 0.9968), 两者均具有较高的拟合度, 其中 EPD 干燥拟合度高于 HPD 干燥拟合度, 呈显著的线性关系 (p < 0.05), 表明 EPD 和 HPD 两种不同干燥方式, 蚕蛹干基含水量对 T<sub>2</sub> 反演谱总峰面积有显著影响。所得模型可通过分析 T<sub>2</sub> 反演图谱结合线性方程间接计算蚕蛹干燥过程中任一

时刻的干基含水量。

### 2.3 干燥方式对蚕蛹干燥过程中核磁共振成像的影响

蚕蛹热泵干燥和变温压差膨化干燥过程的蚕蛹氢质子成像分别图 5a 和 5b。

核磁共振成像 (MRI) 是根据不同位置的氢质子共振频率不同, 获得不同的磁共振信号强度, 不仅能够高效率、高精度、无损伤测定物料水分分布情况以及加工过程中的结构变化, 而且还能够通过图像的清晰度和亮度直观地提供内部结构可视化信息<sup>[19]</sup>。图像

的亮度与氢质子的活跃程度及密度有关, 图像越亮, 说明氢质子的活跃程度越强, 密度越高<sup>[20]</sup>。由图 5 可知, 随着干燥时间的延长, 蚕蛹在 EPD 和 HPD 干燥方式下, 氢质子密度图像亮度均呈下降的趋势, 表明其内部干基含水量逐渐减少; 这与谢小雷等<sup>[21]</sup>报道的用 MRI 技术研究牛肉干燥过程中的 H 质子密度图像变化趋势一致。

蚕蛹在 EPD 过程中干燥不均现象明显, 相对而言 HPD 的 MRI 图信号分布均匀性更好一些。主要是因为 EPD 脆度大于 HPD<sup>[4]</sup>, EPD 能使蚕蛹内部有膨化作用, 使孔道扩充, 质地更加酥脆, 以至于出现干燥不均现象。

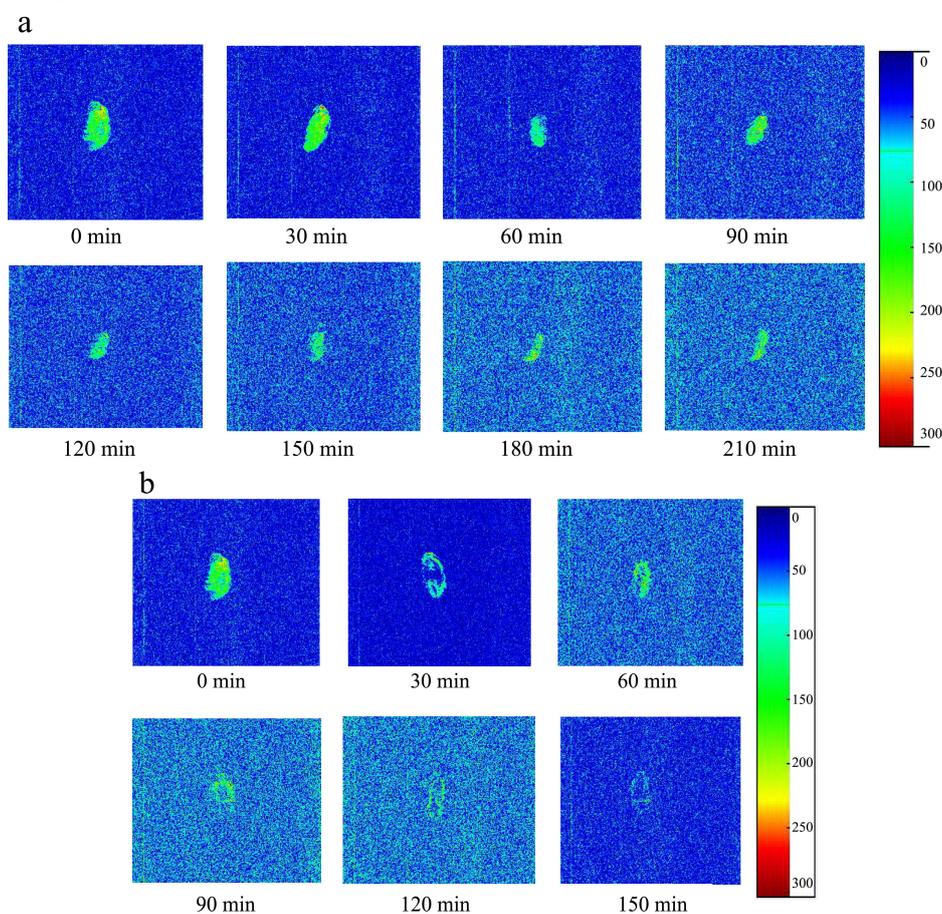


图 5 HPD (a) 和 EPD (b) 干燥方式下蚕蛹氢质子成像对比图

Fig.5 Comparison of hydrogen proton imaging of silkworm pupa under HPD (a) and EPD (b) drying methods

### 3 结论

变温压差膨化干燥 (EPD) 在干燥过程中水分下降较快, 其干燥速率也快于热泵干燥 (HPD)。新鲜蚕蛹内部存在 3 种不同水分状态, 3 种不同水分状态在  $T_2$  反演图谱中对应的横向弛豫时间  $T_2$  范围分别为结合水  $T_{21}$  (0~2 ms)、不易流动水  $T_{22}$  (2~100 ms)、自由水  $T_{23}$  (100~1000 ms), 对应 3 个峰的峰面积分别为: 49.531、661.651、1730.075, 峰面积占比分别为

2.03%、27.10%、70.87%。蚕蛹随着干燥时间的延长, EPD 和 HPD2 种干燥方式下  $T_2$  弛豫时间均呈现出相同的变化趋势, 一方面是峰位置向左迁移, 另一方面是总峰面积  $A_{总}$  不断减小, 水分的主要状态逐步变成不易流动水和结合水。经拟合, 蚕蛹 EPD 和 HPD 过程干基含水量  $x$  和总峰面积  $A_{总}$  之间的关系方程 (定标曲线方程) 分别为  $A_{总}=702.01x+173.92$  及  $A_{总}=695.94x+229.24$ , 两者均呈显著的线性关系 ( $p<0.05$ ), 决定系数 ( $R^2$ ) 分别为 0.9997 和 0.9968, 但热泵干燥

(HPD) 过程的氢质子密度分布相对均匀。综合考虑, EPD 能更好描述蚕蛹干燥过程中水分迁移规律。

### 参考文献

- [1] Xingya Long, Jiajia Song, Xin Zhao, et al. Silkworm pupa oil attenuates acetaminophen-induced acute liver injury by inhibiting oxidative stress-mediated NF- $\kappa$ B signaling [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 237-245
- [2] Yu Zhang, Junhong Wang, Zuoyi Zhu, et al. Identification and characterization of two novel antioxidant peptides from silkworm pupae protein hydrolysates [J]. European Food Research and Technology, 2020: 1-10
- [3] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.蚕蛹变温压差膨化干燥工艺优化[J].食品研究与开发,2021,42(5):153-158  
WU Zhaolong, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Optimization of explosion puffing drying process for silkworm pupa at variable temperatures and pressure difference [J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 153-158
- [4] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.不同干燥方式对蚕蛹干制品品质的影响[J].保鲜与加工,2021,21(5):117-121  
WU Zhaolong L, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Effect of different drying methods on the quality of dried silkworm pupa products [J]. Storage and Process, 2021, 21(5): 117-121
- [5] Attaribo Thomas, Gaiqun Huang, Xiangdong Xin, et al. Effect of the silkworm pupa protein-glucose conjugate on the thermal stability and antioxidant activity of anthocyanins [J]. Food & Function, 2021, 12(9): 4132-4141
- [6] Yuxiao Zou, Tenggen Hu, Yang Shi, et al. Silkworm pupae oil exerts hypercholesterolemic and antioxidant effects in high-cholesterol diet-fed rats [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(7): 2050-2056
- [7] 盘喻颜,段振华,钟静妮.利用低场核磁共振技术分析月柿果片微波间歇干燥过程中的内部水分变化[J].食品工业科技,2021,42(14):33-39  
PAN Yuyan, DUAN Zhenhua, ZHONG Jingni. Analysis of internal moisture changes of persimmon slices during intermittent microwave drying using low-field NMR [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 33-39
- [8] 臧秀.低场核磁共振及成像技术监测海参干制过程中的品质变化[D].大连:大连工业大学,2017  
ZANG Xiu. Quality monitoring analysis of sea cucumber during drying process by low field nuclear magnetic resonance and imaging technology [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017
- [9] 徐建国,徐刚,张绪坤,等.利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J].农业工程学报,2013,29(12): 271-276,293  
XU Jianguo, XU Gang, ZHANG Xukun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(12): 271-276, 293
- [10] Hansen Christian-lyndgaard, Thybo Anette-kistrup, Bertram Hanne-christine, et al. Determination of dry matter content in potato tubers by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. J Agric Food Chem, 2014, 58(19): 10300-10304
- [11] 薛广,李敏,关志强,等.基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律[J].广东海洋大学学报,2020, 40(6):123-129  
XUE Guang, LI Min, GUAN Zhiqiang, et al. Moisture change of tilapia fillet in microwave vacuum drying process based on low-field nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(6): 123-129
- [12] 盘喻颜,段振华,刘艳,等.火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J].食品与机械,2019,35(3):195-201  
PAN Yuyan, DUAN Zhenhua, LIU Yan, et al. Research on properties and kinetic model of intermittent microwave drying to pitaya slices [J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 195-201
- [13] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.蚕蛹热泵干燥特性及其动力学模型研究[J].食品研究与开发,2020,41(18):1-6  
WU Zhaolong, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Heat pump drying characteristics and kinetic modeling of silkworm pupa [J]. Food Research and Development, 2020, 41(18): 1-6
- [14] 吴钊龙,林芳,陈振林,等.蚕蛹变温压差膨化干燥特性及其动力学模型研究[J].食品科技,2020,45(10):88-95  
WU Zhaolong, LIN Fang, CHEN Zhenlin, et al. Drying characteristics and kinetic modeling of silkworm pupa by explosion puffing drying at variable temperatures and pressure difference [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 88-95
- [15] 马慧俐,王松磊,贺晓光,等.不同干燥方式下黄牛肉水分分布迁移规律研究[J].核农学报,2021,35(1):138-146  
MA Huili, WANG Songlei, HE Xiaoguang, et al. Water distribution and migration of yellow beef under different drying methods [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(1): 138-146

