基于低场核磁的西梅干燥过程水分迁移规律

陈烨聪1,康宏彬1,杨忠强2*,孙俪娜2,崔宽波2,董博3

(1. 湖北工业大学农机工程研究设计院,武汉 430068; 2. 新疆农业科学院农业机械化研究所,乌鲁木齐 830091;3. 喀什神恋有机食品有限责任公司,喀什 844000)

摘 要:为探究西梅在干燥过程中水分迁移情况以及在不同温度(50、65、80℃)和风速(1、2、3 m/s)下的干燥特性,该研究基于毕渥数建立了西梅干燥动力学模型,运用低场核磁共振技术分析了干燥过程中不同干燥质量的西梅个体内部水分的分布状态和迁移规律。结果表明:在西梅热泵干燥过程中,水分扩散先为外部扩散控制,随后为内部扩散控制。基于毕渥数的Bi-G模型可以较为准确的描述西梅干燥过程。西梅的干制时长受干燥温度和风速影响,半干时间为3.61~34.47 h,水分有效扩散系数为0.32×10⁻⁸~5.72×10⁻⁸ m²/s。其中,温度的影响较为明显,升高温度能够显著缩短干燥时长,加速西梅内部自由水、半结合水、结合水的扩散与相互转换。在干燥过程中,一方面水分由西梅表皮向外界空气蒸发扩散,另一方面升温干燥使得西梅内部水分传递势发生变化,水分遵循传递势差异向西梅内部扩散达到新的平衡。核磁共振成像图显示,西梅鲜果内部水分分布不均,在干燥质量为60%时内部水分达到平衡点。此后,随着干燥的进行,西梅外表皮水分快速流失,对应干燥中后期出现的结壳现象。这种现象导致水分迁移通道受阻,影响西梅干制时长和品质。因此,基于不同干燥质量的核磁共振成像图,针对西梅不同干燥阶段选择不同的干燥温度进行降温干燥。结果表明,阶段降温干燥能够减少干燥后期表皮结壳硬化带来的影响,缩短干燥时长,提高西梅干燥品质。研究结果可为西梅干燥工艺优化和过程设计提供理论依据。

关键词: 热泵干燥; 含水率; 毕渥数; 低场核磁共振; 西梅

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406053

中图分类号: TS255.1 文献标志码: A

A 文章编号: 1002-6819(2024)-22-0264-09

陈烨聪,康宏彬,杨忠强,等.基于低场核磁的西梅干燥过程水分迁移规律[J].农业工程学报,2024,40(22):264-272. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.202406053 http://www.tcsae.org

CHEN Yecong, KANG Hongbin, YANG Zhongqiang, et al. Analysis of moisture transfer of prunes during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 264-272. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406053 http://www.tcsae.org

0 引 言

西梅(Prunes),又称为欧洲李,蔷薇科李属植物, 主要种植于中国新疆地区。西梅果肉鲜美,营养丰富, 除了含有维生素、矿物质和多种天然抗氧化剂外,还具 有低热量和丰富的膳食纤维的特性,使其具有减肥和促 进消化的功效^[1-2]。新鲜的西梅含水率较高,市场周期较 短,采摘后容易发生失水、软化、腐烂、发霉等一系列 品质劣变影响食用,且对贮藏、运输具有较高要求^[3-4]。 对西梅进行干燥加工,既能延长贮藏期,又能提高西梅 的附加值。热泵干燥技术操作简单、节能环保、热效率 高、干燥产品品质好、处理量大,是目前广泛采用的干 燥方法之一^[5]。

了解物料在干燥过程中的干燥动力学曲线,熟悉其 干燥特性,对后续干燥设备的设计及工艺优化有重要意

收稿日期: 2024-06-07 修订日期: 2024-10-24

基金项目:新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目 (KY2022016);喀什地区科技计划项目(KS2023052)

作者简介: 陈烨聪, 研究方向为农产品加工技术与设备。

Email: yc13160636834@163.com

义。常用薄层干燥动力学模型来描述物料干燥曲线[6-8], 但薄层干燥模型的基础在于狄利克雷边界条件的简化方 程,该方程并没有考虑风速等因素在实际干燥过程中的 影响,造成假设与实际存在一定误差。相关研究已经证 实,干燥风速对干燥速率有显著影响^[6],而诺依曼边界 条件给出了在边界处对指定函数的导数或偏导数的值, 这种描述方式使得物理现象在边界上的变化率变得直观 可测,减小了计算误差。毕渥数 (biot number, Bi) 模型 是基于诺依曼边界条件简化而来的,它可以用来描述热 风干燥过程的水分变化。毕渥数能够反映内部和外部传 质阻力之间的关系^[9],其重要性已在多方面得到证实。 巨浩羽等[10-11] 以传热传质毕渥数揭示阶段降湿热风干燥 对果蔬物料的适用性,为果蔬热风干燥过程中合理调控 相对湿度提供理论依据: GÓRNICKI 等^[12] 通过多种算法, 估算出干燥过程中的毕渥数,为后续传热传质计算提供 理论基础。

水分传递势是新提出的一个概念^[13]。同热的传递势 类似,水分传递势可以看作是水分在传递过程中的一种 "驱动力",一旦打破平衡,能量和质量的传递由高势 位到低势位的方向进行。西梅为非均质结构,存在果肉、 果核等部分,内部水分传递势复杂,因而其水分分布存 在较大差异。通过分析西梅在干燥过程中的水分变化,

[※]通信作者:杨忠强,研究员,研究方向为特色林果产品加工技术及装备。 Email: 003731227@163.com

对评估其烘制过程中品质变化,提升成品质量有着重要 意义。传统水分检测方式难以有效检测其内部水分分布, 且往往对物料具有破坏性。低场核磁共振技术 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 与磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是新兴的水分检测技 术,利用不同区域的质子密度和弛豫时间变化进而分析 出水分子在被检测物料中的分布及迁移规律,具有高效、 无损、准确的优点[14-16],目前广泛应用于农产品、水产 品等领域的无损检测中[17-18]。李梁等[19] 通过研究猕猴桃 切片热风干燥过程中水分迁移规律,建立猕猴桃切片的 含水率预测模型; YOUNAS 等^[20] 将低场核磁共振与多 光谱成像技术结合,探究食品无损检测的新方向;陈明 等[21] 通过测定籽粒中水分的相态,评估籽粒脱水性能, 为种质改良和新种质材料创制提供重要手段。这些研究 都表明了 LF-NMR 与 MRI 技术在农产品水分检测领域 应用的可行性。

为研究西梅热泵干燥过程中的水分迁移状况,改进 后续干燥工艺。在宏观层面,本文通过基于毕渥数的动 力学模型计算不同温度、风速下的水分传递参数,研究 西梅的水分迁移状况;在微观层面,利用 MRI 与 LF-NMR 技术分析西梅干燥过程中水分的分布状态以及相态 变化,为优化西梅热泵干燥工艺提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

西梅鲜果,"法兰西"品种,购买于新疆九鼎农产 品批发市场。选取成熟度合适、大小一致、外表无霉烂, 无病害,无机械损伤果实,初始含水率为80%。

1.2 试验仪器

MesoMR23-060H 中尺寸核磁共振成像分析仪,苏州 纽迈分析仪器股份有限公司; AGHD-15ELC (1.5 P) 空 气能热泵厢式一体节能烘干机,广东澳亿美节能科技有 限公司; LHS16-A 水分测定仪 (精度 1 mg/0.01%),上 海精科天美有限公司; 电子天平 (精度 0.01 g),上海 浦春计量仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备及处理

将西梅放置于促干剂溶液中浸泡 60 s, 脱除表皮蜡 质层,提高干燥效率^[22-23]。之后在清水中清洗 60 s, 擦 去表面多余水分。清洗的目的是洗去西梅表面的残余碱 液,以避免干燥后西梅表面出现白色的碱。根据预试验, 选择相对湿度为 10%,干燥风速为 2 m/s,分别用 50、 65、80 ℃ 的温度进行恒温恒湿干燥试验,同时在相对湿 度为 10%,干燥温度为 65 ℃,分别用 1、2、3 m/s 的干 燥风速进行恒温恒湿干燥试验,干燥过程中每隔 3 小时 取样快速称取质量,直至干燥到初始质量的 30% 后停止 干燥,预试验结果表明该干燥质量下的西梅果干能保持 较好的品质。每组试验重复 3 次。

1.3.2 LF-NMR 检测

参数设置:待测样品温度稳定在磁体温度 32 ℃ 后,

利用分析软件矫正初始系统参数。硬脉冲回波序列成像 参数为: 主频 SF=21 MHz,中心频率 O1 = 232 246 Hz, 90°脉宽 RFA90° = 2.6,180°脉宽 RFA180° = 3.9,重复时 间 TR = 300 ms,回波时间 TE = 20 ms,选层厚度 Slice width = 3 mm,选层层数 Slices = 1,激励次数 Average = 4,读取大小 Read size = 256,设置相位 Phase size = 256。

检测方法:按照测量流程将西梅干燥样品放进核磁 共振分析仪器测量波谱信息。样品重复检测 3 次以减少 操作误差。再从样品中分别选取不同干燥质量的西梅测 量核磁成像图。

1.4 理论模型

1.4.1 干燥参数的计算

水分比 M_R 计算式为

$$M_R = \frac{M_{Ct} - M_{Ce}}{M_{C0} - M_{Ce}}$$
(1)

式中为 *M*_{c0} 物料初始干基含水率,%;*M*_{Ct} 为干燥时间 *t* 时西梅干基含水率,%;*M*_{Ce} 为物料干燥平衡干基含水率,%。

1.4.2 动力学模型

基于毕渥数的 Dincer-Dost、Bi-S、Bi-G、Bi-Di 和 Bi-Re 模型可用于计算干燥过程的水分传递参数以及干 燥过程参数。与薄层干燥模型相比,除了边界条件设置 的差异外,Bi模型的计算还涉及到干燥过程中的温度、 风速等参数,更能反映实际干燥情况^[10,24]。

西梅的菲克二阶扩散方程用式(2)表示:

$$\frac{\partial M_c}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial M_c}{\partial r} \right) \right]$$
(2)

式中 M_c 为含水率,%; t为时间,h; D_{eff} 为有效水分扩散系数,m²/s; r为西梅中心到某一点的距离,m。

假设西梅为均匀球体,内部水分径向一维扩散、传 热对传质的影响可忽略不计(即温度恒定)、流体和固 体(热物理)特性恒定,以及西梅内部水分传递的外部 阻力和内部阻力有限。采用的初始条件与边界条件为

初始条件:

$$t = 0; \ 0 \leq r \leq R; \ M(r,t) = M_i$$
(3)

边界条件:

$$t > 0; r = 0; \ \frac{\partial M}{\partial r}(r, t) = 0$$
 (4)

$$t > 0; r = R; -D_{eff} \frac{\partial M}{\partial r}(r,t) = K_m (M_s - M_e)$$
(5)

式中 R 为西梅等效半径, m; M_i 为初始含水率, %; K_m 为对流传质系数, m/s; M_s 为表面含水率, %; M_e 为平 衡含水率, %。

应用初始条件和边界条件求解式(2)得水分比 *M*_R为

$$M_R = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \tag{6}$$

其中:

$$\begin{cases} A_n = \frac{2\mathrm{Sin}\mu_n}{\mu_n + \mathrm{Sin}\mu_n \mathrm{Cos}\mu_n} \ 0.1 < Bi < 100\\ A_n = \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n} \ Bi > 100 \end{cases}$$
(7)

$$B_n = \exp(-\mu_n^2 F o) \tag{8}$$

式中 Bi 是毕渥数, μ_n 是特征方程的 n 次方根, Fo 是傅立叶数。对于极小的 Fo 值, M_R 可以简化为式 (6) 的第一项, 即:

$$M_R \cong A_1 B_1 \tag{9}$$

各模型毕渥数计算如表1所示:

表1 各模型毕渥数计算式

Table 1 Formulation	on of biot number of each model		
模型 Model	毕渥数 Biot number		
Dincer-Dost	$Bi = \frac{2.1 \times \ln G}{0.759 \ 9 - \ln G}$		
Bi-G	$Bi = 0.057 \ 6 \times G^{26.7}$		
Bi-S	$Bi = 1.238 \ 8 \times S^{1/3}$		
Bi-Di	$Bi = 24.848 \times Di^{-3/8} (Di = \frac{U}{SR})$		
Bi-Re	$Bi = 22.55 \times Re^{-0.59} (Re = \frac{\rho UR}{\mu})$		

注:表中 *G* 为滞后因数,无量纲参数,表示材料内部水分传输阻力;*S* 为干燥系数,s⁻¹,表示物体在单位时间内的干燥能力;*Di* 为无量纲数,表示干燥 气流速度对物料干燥特性的影响;*Re* 为无量纲雷诺数;*U* 为风速,m·s⁻¹;*ρ* 为空气密度,kg·m⁻³; μ 为空气黏度,Pa·s;*R* 是西梅等效半径,m。 Note: In the table, *G* is the hysteresis factor, a dimensionless parameter, which indicates the resistance to moisture transfer within the material;*S* is the drying factor, s⁻¹, which indicates the drying capacity of the object in unit time; *Di* is a dimensionless number, which indicates the effect of drying air velocity on the drying characteristics of the material; *Re* is a dimensionless Reynolds number; *U* is the wind speed, m·s⁻¹; ρ is the air density, kg·m⁻³; μ is the air viscosity, Pa·s; and *R* is the prunes equivalent radius, m.

其中 G 和 S 通过式 (10) 确定:

$$M_R = G \exp(-St) \tag{10}$$

对于 Dincer-Dost 模型, μ_n 的首项 μ_1 为

$$\mu_1 = (1.123 \ 3 \times \ln(4.9Bi+1))^{1/1.4} \tag{11}$$

对于 Bi-G、Bi-S、Bi-Di、Bi-Re 模型,有

$$\mu_1 = -8.325\ 6G^4 + 54.842G^3 + 134.01G^2 + 145.83G - 58.124 \tag{12}$$

对于各模型,有效水分扩散系数 D_{eff} 以及对流传质 系数 K_m 分别为

$$D_{eff} = \frac{SR^2}{\mu_1^2} \tag{13}$$

$$K_m = \frac{D_{eff}Bi}{R} \tag{14}$$

1.4.3 半干时间

半干时间 (half drying time, HDT) 是指将物料中的水 分减少到二分之一所需的时间。根据干燥试验数据得 出的半干时间是由滞后因数 *G* 和干燥系数 *S* 的回归值得 出的:

$$HDT = \frac{\ln 2G}{S}$$
(15)

对于以上模型,半干时间都是通过预测得出的:

$$HDT = \frac{R^2}{\mu_1^2 D_{eff}} \left[\ln 2 \times Exp\left(\frac{0.759\ 9Bi}{2.1 + Bi}\right) \right]$$
(16)

2 结果与分析

2.1 干燥特性

干燥曲线反映干燥特性。图 la 描述了水分比与干燥 时间的关系,由图 la 可知,随着干燥的进行,西梅中的 水分逐渐被去除,直至到达干燥终点,各干燥曲线的变 化趋势均由陡峭逐渐变为平缓,这说明西梅干燥过程为 变速干燥,整体干燥速率逐渐降低。图 lb 描述了干燥速 率与干燥时间的关系,由图 lb 可知,通过提高热泵干燥 温度,增大出风速度均能够加快水分传递速率,加速到 达干燥终点。这是由于在干燥的初期阶段,干燥室温度 与西梅内部形成较大的温度梯度,使热量快速传递,西 梅内部温度上升的同时,水分子动能提高,分子间作用 力减弱,从而加速蒸发^[25]。较高的风速一方面可以促进 介质的热量迅速传给被干燥物质,另一方面则可以迅速 带走物料表面蒸发聚集的水蒸气,及时补充未饱和的空 气,这样有助于减少物料表面水蒸气的分压,从而增加 蒸发动力,使蒸发过程加速。





Fig.1 Drying curves of prunes under different drying conditions

另外,观察到干燥温度为 50 ℃ 时的干燥速率与其 他干燥温度有较大的差异。有研究表明^[26-27],在干燥过 程中,细胞组织中水的传输取决于其路径(细胞内或细 胞外),而路径又取决于温度。低温干燥时,细胞膜结 构完整,水分运输主要在细胞内进行,而在高温干燥条 件(超过 52 ℃)下,细胞膜破损,水分运输在细胞外进 行。两种水分运输方式速率存在较大差异。因此,西梅 在不同温度条件下的干燥速率差异可能是因为低温干燥时, 西梅细胞组织结构保持较为完好, 水分从细胞内部向外迁移过程存在一定阻力导致的。

2.2 水分传递模型

2.2.1 动力学模型参数

基于毕渥数模型估算出的数据如表 2 所示。滞后因 数 G 均大于 1,意味着西梅中存在水分运输的内部阻力。 滞后因数随着温度的升高而降低,干燥系数 S 随着干燥 温度以及干燥风速的升高而提高,且干燥温度对干燥系 数的影响更为显著,这与 WU 等^[28]的研究结果一致;半 干时间随着温度升高、风速增大而降低,是干燥系数 S 在干燥时间上的直观表现。

由表 3 可知,不同模型估算出来的参数均有差异, 毕渥数 Bi 的模型间差异较大,且随温度风速的变化趋势 不同,这可能是由于计算模型和方法不同造成的。除了 干燥温度,风速对毕渥数的大小也有影响,这是因为风 速的增加提高了对流传热系数。有效水分扩散系数 D_{eff} 与传质系数 K_m 的变化遵循一定变化趋势:随着干燥温度的升高,模型估算的有效水分扩散系数与扩散得到了加强。传质系数增加,这表明温度改善了西梅中水分的传递,水分在西梅中的扩散得到了加强。所有模型所估计的毕渥数均大于 0.1,这意味着西梅在干燥过程中水分扩散存在有限的内部和外部阻力。

表 2 各干燥模型统计参数

Table 2	Estimated parameters of each drying models						
变量 Variable	G	S	R^2	SSE	RMSE		
50 °C 2 m·s ^{−1}	1.064	0.022 88	0.980 4	0.057 70	0.041 20		
$65 \ ^{\circ}C \ 2 \ m \cdot s^{-1}$	1.052	0.096 20	0.977 5	0.021 97	0.056 02		
80 °C 2 m \cdot s ⁻¹	1.035	0.205 80	0.989 7	0.010 12	0.041 06		
65 °C 1 m·s ^{−1}	1.059	0.077 68	0.974 9	0.025 01	0.059 78		
65 °C 3 m⋅s ⁻¹	1.055	0.112 90	0.980 0	0.021 18	0.048 51		

注: R^2 为决定系数, SSE 为残差平方和, RMSE 为均方根误差。 Note: R^2 is the coefficient of determination, SSE is the sum of squares errors, and RMSE is the root mean square error.

	表 3	不同干燥模型计算参数
Table 3	Calculated	parameters for different drying model

模型		参数 Parameters					
Model	Variable		Bi	μ_1	$D_{eff}/(\times 10^8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$K_m/(\times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	HDT/h
	50 °C 2 m·s ⁻¹	0	186.7	0.798	0.26	0.30	33.01
	65 °C 2 m·s ^{−1}	0	.150 2	0.710	1.32	1.24	7.95
Dincer-Dost	80 °C 2 m \cdot s ⁻¹	0	.129 6	0.562	4.64	2.89	3.54
	65 °C 1 m·s ^{−1}	0	.141 1	0.686	1.17	1.04	9.54
	65 °C 3 m·s ^{−1}	0	.159 2	0.733	1.50	1.49	6.61
	50 °C 2 m·s ^{−1}	0	301.8	0.716	0.32	0.60	34.47
	65 °C 2 m·s ^{−1}	0	223.0	0.633	1.66	2.32	8.18
Bi-G	80 °C 2 m·s ^{−1}	0	.144 3	0.506	5.72	5.16	3.61
	65 °C 1 m·s ^{−1}	0	.325 4	0.611	1.48	1.91	9.80
	65 °C 3 m·s ^{−1}	0	.266 2	0.654	1.88	2.82	6.83
	50 °C 2 m·s ^{−1}	0	351.7	0.716	0.32	0.70	35.06
	65 °C 2 m·s ^{−1}	0	562.5	0.633	1.66	5.85	9.11
Bi-S	80 °C 2 m·s ^{−1}	0	.731 4	0.506	5.72	26.2	4.32
	65 °C 1 m·s ^{−1}	0	.528 6	0.611	1.48	4.89	10.89
	65 °C 3 m·s ^{−1}	0.598 7		0.654	1.88	7.02	7.63
		Bi	Di	_	1		
	50 °C 2 m·s ^{−1}	0.986	5 463.29	0.716	0.32	1.95	40.90
Bi-Di	65 °C 2 m·s ^{−1}	1.672	1 335.18	0.633	1.66	17.4	11.00
	80 °C 2 m·s ^{−1}	2.246	607.39	0.506	5.72	80.4	5.28
	65 °C 1 m·s ^{−1}	1.541	804.58	0.611	1.48	18.7	14.35
	65 °C 3 m·s ^{−1}	2.022	1 660.76	0.654	1.88	18.1	8.89
		Bi	Re	_			
	50 °C 2 m·s ^{−1}	0.285	1 647.918	0.716	0.32	0.57	34.27
Bi-Re	65 °C 2 m·s ^{−1}	0.308	1 443.115	0.633	1.66	3.21	8.40
	80 °C 2 m \cdot s ⁻¹	0.327	1 304.009	0.506	5.72	1.17	3.83
	65 °C 1 m·s ^{−1}	0.464	721.558	0.611	1.48	4.30	11.27
	65 °C 3 m·s ⁻¹	0.243	2 164.673	0.654	1.88	22.84`	9.02

注: µ₁为µ_n的首项(µ_n为特征方程的n次方); D_{eff}为有效水分扩散系数; K_m为对流传质系数; HTD为半干时间; Di表示干燥气流速度对物料干燥特性的影响; Re为雷诺数。

Note: μ_1 is the first term of μ_n (μ_n is the NTH power of the characteristic equation); D_{eff} is the effective moisture diffusivity; K_m is the convective mass transfer coefficient; HTD is the half drying time; Di denotes the effect of drying gas velocity on the drying characteristics of the material; Re is the Reynolds number.

2.2.2 动力学模型选择及验证

所选试验组通过数学模型拟合出的 R² 的范围为 0.974 9~0.989 7。通过比较各计算参数及各模型实际拟 合效果,最终确定 Bi-G 模型有较好的预测效果。

为了验证该模型的准确程度,进行了补充验证,试 验条件为相对湿度 10%、 温度为 65 ℃、 风速为 2 m/s, 结果如图 2 所示。Bi-G 模型能够较好地描述西梅片热泵 干燥过程中的水分比变化情况。

2.3 水分状态及分布

2.3.1 核磁共振成像分析

图 3 为西梅鲜果剖面图,鲜果果肉饱满多汁,颜色 金黄且分布均匀;果核坚硬,与果肉易分离;果皮较薄, 具有一定韧性。低场核磁共振技术能够检测氢质子在样 品中的空间分布情况,一般而言,磁共振成像得到的灰 度图能够直观反映物料内部水分的分布^[29-30]。常将灰度 图转化为伪彩图,经过伪彩处理后的西梅核磁共振图像 有助于提高判别图像细节^[31-32]。



图 3 西梅鲜果剖面 Fig.3 Fresh prunes profile

由图 4 核磁共振成像图可以看出,西梅鲜果内部水 分分布差异明显,果皮附近区域水分"密度"高。果肉 与果核衔接处水分"密度"仅次于果皮,这可能是因为 该处的特殊构造,水分相对容易在衔接面聚集,而不在 紧密相连的果肉细胞中;干燥质量为 75%时,水分从果 皮向果肉扩散,果肉区域氢质子密度增加;干燥质量为 60%时,果皮与果肉区域氢质子密度基本一致,果核出 现"镂空"现象;干燥质量为 45%时,果核"镂空"区 域进一步扩大,图像边缘出现不规则形状,这是因为西 梅表皮水分流失过多,皱缩严重导致的;干燥质量为 30%时,伪彩图已无明显轮廓,灰度图显色黯淡,果核 区域仍有小部分水分残留。

将不同干燥质量西梅切片以研究其内部水分分布,并 验证核磁成像图的成像结果。如图 5 所示,鲜果剖面相 对光滑,颜色鲜亮,75%和60%干燥质量西梅剖面有汁 液渗出,颜色无明显变化,这可能是由于干燥过程中细 胞膜破裂和渗透压变化导致的,45%和30%干燥质量的 西梅剖面颜色黯淡,果肉黏稠厚实。剖面图整体与核磁 成像结果基本吻合。



注: 伪彩图/灰度图的红色/白色区域表示氢质子密度高, 蓝色/黑色区域表 示氢质子密度低。干燥质量=当前质量/初始质量,%。

Note: The red/white areas of the pseudo-colour/grey scale map indicate high hydrogen proton density, and the blue/black areas indicate low hydrogen proton density. Drying mass = current mass /initial mass, %





图 5 西梅不同干燥质量剖面图与核磁成像对比图 Fig.5 Comparison of profiles and NMRI of prunes with different drying masses

综上所述,西梅鲜果内部水分传递势差异较大,因 而水分分布不均。在干燥前期,西梅表面温度迅速升高, 热量以热传导的方式向内部传递。此时,西梅的水分主 要从表皮向外界扩散蒸发,为外部扩散控制。随着干燥 过程的进行,西梅内部温度的上升影响了果肉细胞的型 态结构,这些微观结构的变化会打破西梅内部的水分传 递势平衡,并遵循传递势差异扩散形成新的平衡。在水 分扩散达到新的平衡后,内部水分传递势差异减小,果 皮与果肉之间的水分传递速度小于果皮水分向外界蒸发 扩散的速度,此时为内部扩散控制。这导致果皮失水皱 缩变硬,颜色加深,阻碍了水分迁移通路,对后续水分 扩散造成影响。

2.3.2 水分分布及其组成变化

核磁共振成像图能够直观显示西梅干燥期间水分的

迁移规律以及分布状况,然而却无法进一步分析西梅干燥过程中水分相态的变化。常通过 *T*₂ 反演图谱展示的弛豫时间长短以及对应的信号幅值大小来量化分析水分相态以及变化过程^[18,33]。弛豫时间与氢原子运动性相关,较长的弛豫时间意味着氢原子运动性好、自由度高。按弛豫时间划分物料 3 种水分的存在形式^[34-35]:结合水横向弛豫时间 *T*₂₁ (0.1~10 ms)、半结合水横向弛豫时间 *T*₂₂ (10~100 ms)、自由水横向弛豫时间 *T*₂₃ (>100 ms)。各自对应的水峰面积分别为 *A*₂₁、 *A*₂₂、 *A*₂₃。

各干燥时间对应 T₂ 反演图谱如图 6 所示,不同相态 的水分含量与其对应的弛豫峰峰面积正相关,西梅鲜果 自由水含量最高,弛豫波峰出现在 1 000 ms 左右,为自 由水波峰,能占到总水分含量的 90% 以上,在 25 ms 处 有一个小波峰,这表明西梅鲜果中存在一定的半结合水。 随着干燥过程的进行,T₂ 反演谱图的总峰面积 A₂ 在不断 减小,且各波峰逐渐"左移",即向弛豫时间短的方向 移动。这表明干燥过程中水分除了向外扩散蒸发,还发 生了相态上的转变。



注: T₂₁、T₂₂、T₂₃为结合水、半结合水、自由水。 Note: T₂₁ is bound water; T₂₂ is semi-bound water; T₂₃ is free water.

图 6 西梅不同干燥时间对应的弛豫谱图 Fig.6 Relaxation spectra of prunes with different drying times

图 7 展示了 3 种弛豫峰面积在干燥过程中的变化趋势。



注: A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别为结合水、半结合水和自由水的峰面积, A_2 为3种水分状态峰面积之和,

Note: A_{21} , A_{22} , A_{23} are the peak areas of bound water, semi-bound water and free water, respectively, A_2 is the sum of the peak areas of the three water forms.

图 7 干燥过程中不同水分相态峰面积的变化曲线

Fig.7 Change curves of peak areas of different moisture phases during drying process

3 种水分状态分别在不同干燥节点上占据主导地位: 西梅鲜果内部自由水含量最高,为总水分的 93%;干燥 中期,西梅内部半结合水含量最高,为总水分的 86%; 干燥结束,西梅内部结合水含量最高,为总水分的 93%。 在干燥前期,自由水峰面积 A₂₃ 快速下降,半结合水峰 面积 A₂₂ 略微上升,这主要是因为在干燥过程中,内部 部分结合力相对较弱的自由水先被脱除,部分自由水随 着果肉中碳水化合物(主要是果糖、葡萄糖和蔗糖)的 浓度增加而被束缚,并向半结合水转变^[36-37]。半结合水峰 面积 A₂₂ 在干燥中期(16 h)达到峰值,随后开始逐渐下 降。这是因为结合力较弱的自由水在干燥中期已基本被 脱除,半结合水成为被脱除的主要目标,部分半结合水 在干燥过程中转化为结合水。到达干燥终点时,自由水 和半结合水均已基本脱除,西梅内部水分主要为结合水。

2.4 干燥过程的工艺优化

西梅的干燥速度随时间的推移而减小,一方面是因 为西梅总体水分含量下降,另一方面是因为干燥过程中 表皮硬化,堵塞水分迁移通路,物料内部水分无法向外 迁移。在干燥过程中的水分扩散先为外部扩散控制,随 后属于内部扩散控制。

为实现工艺优化,缩短物料干燥时间,改善干燥质 量,可以从水分迁移方向入手,减小因水分梯度差异带 来的向内扩散速率,提高干燥速率。巨浩羽等^[38]通过改 变相对湿度来减缓物料表面结壳硬化带来的影响。但西 梅鲜果大部分水分分布在果皮周围的细胞中,可以尝试 使用阶段降温干燥来改善干燥工艺。在干燥前期使用较 高温度使西梅迅速升温,加速表皮水分蒸发,中后期逐 渐降低温度,减缓外表皮"结壳"硬化速度,保持水分 迁移通路。

西梅在干燥质量为 60% 时,果肉与果皮水分含量达 到平衡点,将该转折点作为参考依据优化西梅阶段降温 干燥工艺。干燥前期温度设置为 70 ℃,持续 8 h,中期 温度 65 ℃ 持续 8 h,后期温度为 60 ℃,持续 8 h,最后 用 50 ℃ 烘至目标质量,并将阶段降温干燥曲线与 65 ℃ 恒温干燥曲线做比较。

如图 8 所示,阶段降温干燥前期,较高的干燥温度 可以使西梅内部迅速升温,加速表面水分向外界蒸发, 干燥中后期通过降低干燥温度,减缓表皮硬化结壳的过 程,维持水分迁移通路,使内部水分及时扩散到表皮, 进而向外界蒸发扩散。恒温干燥在干燥后期,由于长时 间处于高温状态,西梅表皮容易形成结壳硬化,水分更 难从内部转移到表面,从而使干燥时间延长^[39]。



图 8 西梅不同干燥工艺的干燥曲线 Fig.8 Drying curves of different drying processes for prunes

试验中还发现,较低的终末干燥温度不仅能够使表 皮软化,改善口感,还能够减缓内部果肉和表皮的褐变 程度,提升西梅干燥品质。阶段降温干燥与 65 ℃ 恒温 干燥相比,所需干燥时间缩短了 10%。综合比较,在西 梅热泵干燥条件下,阶段降温干燥要优于恒温干燥。

3 结 论

1) 西梅在热泵干燥过程中,先为外部扩散控制,后 为内部扩散控制。温度和风速对其干燥特性均有影响: 提高干燥温度以及加快出风速度均能缩短干燥时间,且 干燥温度对西梅干燥时间的影响更显著。基于毕渥数的 Bi-G 模型对西梅热泵干燥过程的干燥参数以及水分传递 参数有更好的拟合度。

2)通过对不同干燥质量的西梅质子密度图进行研究 发现,西梅鲜果内部水分分布不均,果皮水分"密度较高"。随着干燥过程的推进,西梅内部传递势发生改变,水分也随之流动。在干燥质量 60%时西梅内部水分分布 较为均匀,水分传递势基本达到一致,此时核磁成像图 果皮果肉区域氢质子密度均一。干燥后期表皮水分流失 过快,导致表皮皱缩变硬,水分向外迁移受阻。

3) 西梅内部水分以自由水、半结合水和结合水 3 种 水分状态存在。3 种水分状态各自在不同干燥节点上占 据主导地位:西梅鲜果内部自由水含量最高,为总水分 的 93%;干燥中期,西梅内部半结合水含量最高,为总 水分的 86%;干燥结束,西梅内部结合水含量最高,为 总水分的 93%。在整个干燥过程中,3 种水分之间存在 相互转换关系,但整体转换趋势为结合力较弱的自由水 往结合力较强的结合水转换。

4)西梅在干燥中后期表皮会出现"结壳"硬化现象, 堵塞水分迁移通路,影响干燥效率。阶段降温干燥与恒 温干燥相比,不仅能够减缓表皮硬化速度,加速水分蒸 发扩散,对于西梅品质也有一定提升。

本研究基于毕渥数分析了西梅在不同温度、风速下 的干燥特性,利用低场核磁共振技术及其成像技术解析 了西梅内部水分分布及其迁移变化的规律,为后续西梅 干燥工艺优化提供理论依据。

[参考文献]

- 徐天旭,欧阳萍,贺灵灵,等.西梅膳食纤维提取工艺优化 及其通便作用[J].食品工业科技,2023,44(10):369-378.
 XU Tianxu, OUYANG Ping, HE Lingling, et al. Optimization of extraction process of prune dietary fiber and its laxative effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 369-378. (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩宏伟,邱杰,李勇,等.不同品种西梅电热烘干工艺研 究[J]. 经济林研究, 2014, 32(4): 120-126.
 HAN Hongwei, QIU Jie, LI Yong, et al. Electric drying process conditions of different varieties of prunes[J]. Nonwood Forest Research, 2014, 32(4): 120-126. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李忠,王向未,董成虎.不同处理方式对西梅贮藏品质的 影响[J].保鲜与加工,2023,23(4):16-19
 LI Zhong, WANG Xiangwei, DONG Chenghu. Effects of different treatments on the storage quality of prunus domestica

L.[J]. Storage and Process, 2023, 23(4): 16-19. (in Chinese with English abstract)

- [4] 刘志旭,朱璇,赵亚婷,等.高浓度 CO₂短时处理对西梅 采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 311-318.
 LIU Zhixu, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Effects of shortterm treatment with high concentration CO₂ on postharvest storage quality and antioxidant metabolism of plums[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 311-318. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张派伟,张振迎,武雨萌,等.热泵干燥技术的应用现状 及展望[J].化学工程,2024,52(6):40-46. ZHANG Paiwei, ZHANG Zhenying, WU Yumeng, et al. Application and prospects of heat pump drying technology[J]. Chemical Engineering, 2024, 52(6): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王志鹏,徐智昕,范利君,等.西梅热风干燥特性及品质的研究[J].食品工业科技,2023,44(24):103-110.
 WANG Zhipeng, XU Zhixin, FAN Lijun, et al. Study on the characteristics and quality of hot air drying of prune[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘永富,谭安林,潘小莉,等.龙眼果肉微波真空薄层干燥数学模型研究[J].安徽农业科学,2021,49(4):182-185.
 LIU Yongfu, TAN Anlin, PAN Xiaoli, et al. Study on the mathematical model of microwave vacuum thin layer drying of longan pulp[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(4):182-185. (in Chinese with English abstract)
- [8] 尹晓峰,杨玲.稻谷薄层红外干燥特性及数学模型[J].中国粮油学报,2024,39(2):11-19.
 YIN Xiaofeng, YANG Ling. Characteristics and mathematical models for infrared-dried rough rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2):11-19. (in Chinese with English abstract)
- [9] GINER S A, IRIGOYEN R M T, CICUTTÍN S, et al. The variable nature of Biot numbers in food drying[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(2): 214-222.
- [10] 巨浩羽,张卫鹏,张鹏飞,等.基于毕渥数的果蔬阶段降湿 热风干燥特性[J].农业工程学报,2022,38(12):317-324. JU Haoyu, ZHANG Weipeng, ZHANG Pengfei, et al. Hot drying characteristics of fruits and vegetables during heat and mass transfer using Biot numbers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 317-324. (in Chinese with English abstract)
- [11] 巨浩羽, 邹燕子, 肖红伟, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干 燥过程中水分迁移和蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 232-240.
 JU Haoyu, ZOU Yanzi, XIAO Hongwei, et al. Effects of relative humidity on water diffusion and evaporation during hot air drying of carrot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(1): 232-240. (in Chinese with English abstract)
- [12] GÓRNICKI K, WINICZENKO R, KALETA A. Estimation of the biot number using genetic algorithms: Application for the drying process[J]. Energies, 2019, 12(14): 2822.
- [13] 刘相东. 现代干燥技术[M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [14] 朱文学,尤泰斐,白喜婷,等.基于低场核磁的马铃薯切 片干燥过程水分迁移规律研究[J]. 农业机械学报,2018,49(12):364-370.
 ZHU Wenxue, YOU Taifei, BAI Xiting, et al. Analysis of

moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 364-370. (in Chinese with English abstract)

[15] 渠琛玲, 汪紫薇, 王雪珂, 等. 基于低场核磁共振的热风 干燥过程花生仁含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 290-296.

QU Chenling, WANG Ziwei, WANG Xueke, et al. Prediction model of moisture in peanut kernel during hot air drying based on LF-NMR technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(12): 290-296. (in Chinese with English abstract)

[16] 宋平,徐静,马贺男,等.利用低场核磁共振及其成像技术分析水稻浸种过程水分传递[J].农业工程学报,2016, 32(17): 274-280.

SONG Ping, XU Jing, MA Henan, et al. Analysis on moisture transport in process of rice soaking using low field nuclear magnetic resonance and its imaging[J]. Transactions of the Chinese Sasdociety of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 274-280. (in Chinese with English abstract)

- [17] MELVINA C, JOHN NA, ZHANG M. Online low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) for food quality optimization in food processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(9): 1435-1451.
- [18] JIA C, WANG L, YIN SW, et al. Low-field nuclear magnetic resonance for the determination of water diffusion characteristics and activation energy of wheat drying[J]. Drying Technology, 2020, 38(7): 917-927.
- [19] 李梁,程秀峰,杨尚雄,等.基于低场核磁共振的热风干燥猕猴桃切片含水率预测模型[J].农业工程学报,2020,36(10):252-260.
 LI Liang, CHENG Xiufeng, YANG Shangxiong, et al. Model for predicting the moisture content of kiwifruit slices during hot air drying based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 252-260. (in Chinese with English abstract)
- [20] YOUNAS S, MAO Y, LIU C H, et al. Measurement of water fractions in freeze-dried shiitake mushroom by means of multispectral imaging (MSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 96: 103694.

[21] 陈明,李金龙,李伟,等.利用低场核磁共振进行活体玉米籽粒水分动态测试与成像[J].农业工程学报,2020,36(23):285-292.
CHEN Ming, LI Jinlong, LI Wei, et al. Dynamic testing and imaging of living maize kernel moisture using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 285-292. (in Chinese with English abstract)

- [22] 李玲玲,袁航,叶子,等.促干剂对热风条件下西梅品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(11):238-244.
 LI Lingling, YUAN Hang, YE Zi, et al. Effect of desiccant on the quality of *prunus domestica* L. under hot air condition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11):238-244. (in Chinese with English abstract)
- [23] 魏明,张倩,钱森和,等.不同预处理对铁皮石斛热风干燥
 特性及品质的影响[J].农业工程学报,2022,38(8):281-287.
 WEI Ming, ZHANG Qian, QIAN Senhe, et al Effects of

different pretreatment methods on the hot-air drying characteristics and quality of *Dendrobium officinale* stems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 281-287. (in Chinese with English abstract)

- [24] AGBEDE O O, OYEWO F A, AWORANTI O A, et al. Convective drying characteristics and moisture transfer properties of *Jatropha curcas* L. seeds[J]. Scientific African, 2024, 23: e02122.
- [25] 贲宗友,张季伟,韩动梁,等.谷朊粉颗粒热风干燥动力 学模型及水分迁移规律[J].农业工程,2022,12(8):62-67.
 BEN Zongyou, ZHANG Jiwei, HAN Dongliang, et al. Dynamic model and moisture migration law of gluten pellets in hot air drying[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(8):62-67. (in Chinese with English abstract)
- [26] 肖波, 贠弘祥, 杨德勇, 等. 马铃薯薄壁细胞组织一维等 温干燥模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 309-319.
 XIAO Bo, YUN Hongxiang, YANG Deyong, et al. Onedimensional isothermal drying model for parenchyma cell tissue of potato tuber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(16): 309-319. (in Chinese with English abstract)
- [27] HAIDER A, DATTA A K, SPANSWICK R M. Water transport in cellular tissues during thermal processing[J]. Aiche Journal, 2011, 57(9): 2574-2588.
- [28] WU X F, ZHANG M, Li Z Q. Dehydration modeling of *Cordyceps militaris* in mid-infrared-assisted convection drying system: Using low-field nuclear magnetic resonance with the aid of ELM and PLSR[J]. Drying Technology, 2019, 37(16): 2072-2086.
- [29] ZHANG B, LI M, QIAO Y T, et al. Potential use of low-field nuclear magnetic resonance to determine the drying characteristics and quality of *Arctium lappa* L. in hot-blast air[J]. Food Science and Technology, 2020, 132: 109829.
- [30] 陈文玉,穆宏磊,吴伟杰,等.利用低场核磁共振技术无 损检测澳洲坚果含水率[J].农业工程学报,2020,36(11): 303-309.

CHEN Wenyu, MU Honglei, WU Weijie, et al. Nondestructive measurement of moisture content of macadamia nuts by lowfield nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 303-309. (in Chinese with English abstract)

- [31] ZHU Y Y, JU R H, MA F F, et al. Moisture variation analysis of the green plum during the drying process based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(12): 5137-5147.
- [32] 陈毅,顾莹,宋平,等.利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏 过程中水分含量及迁移变化[J]. 农业工程学报,2022, 38(17): 321-328.
 CHEN Yi, GU Ying, SONG Ping, et al. Analysis of the moisture content and migration changes of blueberries during storage by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 321-328. (in Chinese with English abstract)
 [22] YUK, LULY, CAO YL, et al. Determination of maintaine
- [33] XU K, LU J X, GAO Y L, et al. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Drying Technology, 2017, 35(15): 1909-1918.
- [34] 刘建波,李璐,徐庆,等.基于低场核磁的青萝卜块低压 过热蒸汽干燥机理研究[J].包装与食品机械,2023,41(4):

33-38, 45.

LIU Jianbo, LI Lu, XU Qing, et al. Study on the mechanism of low-pressure superheated steam drying of green carrot pieces based on low-field nuclear magnetism[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(4): 33-38,45. (in Chinese with English abstract)

- [35] 任爱清, 蔡文, 韩春阳, 等. LF-NMR 结合 MRI 分析热泵 干燥过程中黑木耳水分迁移[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 10-16.
 REN Aiqing, CAI Wen, HAN Chunyang, et al. Investigating water migration in auricularia auricula during heat pump drying at different temperatures using LF-NMR and MRI[J].
 Food Research and Development, 2023, 44(10): 10-16. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张晓敏,徐玉娟,余元善,等.龙眼间歇热泵干燥特性及 干燥过程品质变化[J/OL].食品工业科技,[2024-06-07]: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120008.
 ZHANG Xiaomin, XU Yujuan, YU Yuanshan, et al. Study on drying characteristics and quality properties of longan (*dimocarpus longan* lour.) during intermittent heat pump drying[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, [2024-06-07]: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120008. (in Chinese with English abstract)
- [37] 高晓倩,刘瑞玲,吴来春,等.基于 LF-NMR 研究双孢菇

远红外辅助热泵干燥过程中水分迁移规律及品质变化[J]. 中国食品学报,2024,24(8):403-413.

GAO Xiaoqian, LIU Ruiling, WU Laichun, et al. Studies on water migration rule and quality change of agaricus bisporus during far-infrared assisted heat pump drying based on LF-NMR technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 403-413. (in Chinese with English abstract)

- [38] 巨浩羽,张卫鹏,于贤龙,等.恒温下相对湿度对果蔬热风干燥特性和品质的影响及调控[J].农业工程学报,2024,40(2):29-40.
 JU Haoyu, ZHANG Weipeng, YU Xianlong, et al. Influence of relative humidity on the drying characteristics and quality of fruits and vegetables during constant temperature hot air drying as well as controlling strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),
- 2024, 40(2): 29-40. (in Chinese with English abstract) [39] 廖雅萱,程少波,张伟达,等.骏枣变温干燥工艺优化及 品质评价[J].农业工程学报,2023,39(6): 237-246. LIAO Yaxuan, CHENG Shaobo, ZHANG Weida, et al. Optimization of variable temperature drying process and quality evaluation of Junzao[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(6): 237-246. (in Chinese with English abstract)

Analysis of moisture transfer of prunes during drying using low-field NMR

CHEN Yecong¹ , KANG Hongbin¹ , YANG Zhongqiang²^{*} , SUN Lina² , CUI Kuanbo² , DONG Bo³

Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
 Agricultural Mechanization Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;
 Kashgar Love Organic Food Co., Ltd, Kashgar 844000, China)

Abstract: Prunes is one of the favorite fruits in the genus Prunus of the family Rosaceae, mainly planted in the Xinjiang Province of China. Fresh prunes are prone to water loss, softening, rotting, mold, and a series of quality degradations, due to the high moisture content. Drying prunes can extend the storage period for a long shelf life, particularly for the added value of the product. In this study, a series of experiments were carried out to investigate the moisture migration during drying. The drying characteristics of prunes were obtained at different temperatures (50, 65, and 80 °C) and wind speeds (1, 2, and 3 m/s). Five kinetic models were then selected to fit the drying curve using the Biot number. Among them, the Bi-G model accurately represented the drying, according to the processing parameters and the fitted curves. Overall, the drying rate decreased gradually, while the moisture diffusion was first controlled externally, and then controlled by internal diffusion; The moisture diffusion efficiency increased with the increase of drying temperature and wind speed. The more significant effect of drying temperature was observed at the same time. The low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) imaging technique was used to collect the relaxation spectrum and proton density images of prunes. Magnetic resonance imaging (MRI) images showed an uneven distribution of water in the fresh prune fruits. Particularly, the epidermal region shared a significantly higher water density than the pulp one. There was a variation in the water transfer potential inside the prune, as the drying process progressed. Water flowed to form a new equilibrium following the difference in transfer potential. The internal moisture reached the equilibrium point at 60% dry mass. The internal water existed in three forms: free, semi-bound, and combined water, which were dominated at different drying points: free water was the highest in fresh prunes, accounting for 93% of the total moisture; semi-bound water was the highest in prunes at the middle stage of the drying, accounting for 86% of the total; and combined water was the highest in prunes at the end of the drying, accounting for 93% of the total. There was an interconversion relationship among the three forms of water during the whole drying. However, the overall trend of conversion was attributed that the water with a weaker binding force was converted to the water with a stronger binding force. There were two main directions of water migration: water diffused from the skin of the prunes to the outside air by evaporation; and water diffused to the inside of the prunes following the difference of water gradient. The surface of the prunes was crusted to block the moisture migration pathway during drying. As such, the drying rate was reduced to obtain the high drying quality of prune. The step-down temperature drying was allowed for the prune skin moisture to maintain a moderate drying rate, in order to prevent the surface from drying too fast and crust formation. The drying quality of prunes was enhanced significantly, compared with the constant temperature drying. The finding can provide the theoretical basis to optimize the prunes drying. Keywords: heat pump drying; moisture content; biot number; low-field nuclear magnetic resonance; prunes