

酸菜微波真空冷冻干燥工艺及复水特性研究

Study on microwave vacuum freeze drying technology and rehydration characteristics of sauerkraut

贺健¹ 易军鹏¹ 李欣² 段续¹ 任广跃¹ 吴甜甜¹

HE Jian¹ YI Jun-peng¹ LI Xin² DUAN Xu¹ REN Guang-yue¹ WU Tian-tian¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南科技大学化工与制药学院, 河南 洛阳 471023)

(1. School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. College of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:采用微波真空冷冻干燥技术对新鲜酸菜进行脱水处理,研究微波功率、真空度和铺料层厚度对酸菜干燥特性及复水比的影响,确定最佳干燥条件,并利用低场核磁共振技术(LF-NMR)研究酸菜干制品在复水过程中的水分状态。结果表明:微波功率越大、真空度越小、铺料层厚度越小,则酸菜干燥速率越大,达干燥终点时间越短;最佳干燥工艺条件为微波功率320 W,真空度200 Pa,铺料层厚度2 mm,此时酸菜复水比为9.14 g/g;LF-NMR表明不易流动水为复水后酸菜体内水分的主要存在形式,结合水与自由水则变化不大。

关键词:酸菜;微波真空冷冻干燥;干燥曲线;复水比;水分分布

Abstract: Using microwave vacuum freeze-drying technology to dehydrate fresh sauerkraut, study the influence of microwave power, vacuum degree and layer thickness on the drying characteristics and rehydration ratio of sauerkraut, determine the best drying conditions, and the low-field nuclear magnetic resonance technology (LF-NMR) was used to study the moisture state of dried pickled cabbage products during rehydration. The results showed that the drying rate of sauerkraut increased with higher microwave power, lower vacuum degree, and smaller thickness of the material layer, and the drying time was shortened. the optimal drying process conditions were found to include microwave power of 320 W, vacuum of 200 Pa, 2 mm of the thickness of the pavement layer, and the rehydration ratio of sauerkraut was 9.14 g/g. The LF-NMR showed that the difficult-to-flow water

was the main form of water in the sauerkraut after rehydration, and few changes were found in the combined water and free water.

Keywords: sauerkraut; microwave vacuum freeze-drying; drying curve; rehydration ratio; water distribution

酸菜是指低浓度食盐溶液条件下经乳酸发酵制备而成的贮藏型蔬菜^[1]。其既保留了蔬菜自身的维生素C、氨基酸、膳食纤维、矿物质等营养物质^[2-3],且经发酵后又富含益生菌、乳酸菌等功能微生物。酸菜酸咸适度,口感鲜美嫩脆,适当食用可达到降低胆固醇、增加胃肠道有益菌、预防心脑血管疾病、防止便秘等效果^[4-6]。然而酸菜含有大量水分、不易贮藏和运输,易腐烂变质,其产品较为单一,多为软罐头形式流通,且需高温杀菌才能长时间保存,导致口感较差,益生菌基本失活。目前对酸菜加工的研究多为发酵工艺优化、菌种筛选等,而关于酸菜深加工产品研究极少^[7]。

干燥是一种常见的延长食品保质期的加工方式。经干燥后,食品基本没有自由水分,可抑制微生物快速生长繁殖和酶活性,同时干燥产品可以保持良好的品质,有利于长期保存和运输^[8-9]。酸菜中乳酸菌的生长温度为5~55℃,最适生长温度为30~40℃^[10-11],温度过高会对乳酸菌产生杀灭作用^[12]。因此热风、热泵干燥等干燥方式不利于酸菜的干制加工。微波真空冷冻干燥(Microwave vacuum freeze-drying, MFD)是将传统的真空冷冻干燥技术与高效的微波加热技术相结合来提供水分升华需要的能量,无需媒介即可对物料进行整体加热的一种很有潜力的技术^[13-14]。与真空冷冻干燥相比,MFD在升温速度、干燥时间、干燥效率和整体能耗方面都有较大提升^[15-16];与热风、热泵干燥相比,微波的穿透性使得微波能直接对物料内外进行整体加热,从而使物料中的固

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:182102110085)

作者简介:贺健,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:易军鹏(1976—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: yijunpeng@126.com

收稿日期:2020-05-30

态水吸收热量迅速升华为水蒸气,最大限度地保持了物料原有的品质、风味和营养成分,且复水性较高^[17-19]。张海伟等^[20]研究表明采用三段式微波真空冷冻干燥香菇比热风干燥、冷冻干燥加工时间更短,产品复水性更高。叶晓梦^[21]研究表明,冻干—微波真空联合干燥产品的品质非常接近于冷冻干燥产品,同时减少约 31% 的干燥时间,能耗大幅度降低。Duan 等^[22]研究表明,微波冷冻干燥条件下的双孢菇干制品品质与冷冻干燥的产品相当,但其能耗远远低于冷冻干燥。

MFD 技术兼具干燥效率和产品品质,是缩短生产周期最佳的干燥方式之一,已成功应用于水果、蔬菜、中药材和部分肉类中,但尚未见对酸菜进行干燥的研究。试验拟研究 MFD 对酸菜的干燥特性、复水特性及干燥能耗的影响,并采用响应面优化法得出最佳复水比工艺条件,为实现酸菜干制品在作为家用即食辅料、高端蔬菜包和实现酸菜大批量、高效、高品质干燥的工厂化提供相关的依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

酸菜:榆园酸菜,配料为大白菜、水、食用盐、植物乳杆菌,沈阳榆园食品有限公司;

试验用水均为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

快速水分测定仪:CS-001X 型,深圳市冠亚技术科技有限公司;

低场核磁共振成像分析仪:NMI20 型,纽迈电子科技有限公司;

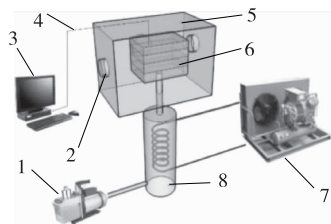
水浴锅:YLJYE-100 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

电子天平:JJ223BC 型,常熟市双杰测试仪器厂;

微波真空冷冻干燥机:Duan 等^[22]设计制造,其设备原理如图 1 所示。

1.3 试验方法

1.3.1 预处理 将酸菜去掉包装,挤出多余水分,切丝



1. 真空泵 2. 微波输入 3. 控制系统 4. 光纤温度传感器
5. 微波谐振腔 6. 干燥腔和料盘 7. 制冷设备 8. 冷阱

图 1 微波冷冻干燥机原理图

Figure 1 Schematic diagram of microwave freeze dryer

(6 mm×1 mm),于-25℃冻结 8 h,备用。此酸菜初始湿基含水率约为 92.94%。

1.3.2 干燥试验设计 将酸菜丝平铺于干燥箱物料盘内,每盘放入 50 g。将微波真空冷冻干燥机冷阱温度设定为-40℃,进行单因素干燥试验。干燥过程中,每隔 30 min 将物料盘取出称量,记录数据后迅速放回继续干燥,直至酸菜含水率降至安全贮藏条件(干基含水率降为 0.35 g/g)以下时,结束干燥。每组干燥试验平行操作 3 次,取平均值。

(1) 微波功率:固定真空度 200 Pa,铺料层厚度 2 mm,考察微波功率(50,200,350,500 W)对酸菜干燥特性的影响。

(2) 真空度:固定微波功率 350 W,铺料层厚度 2 mm,考察真空度(100,200,300,400 Pa)对酸菜干燥特性的影响。

(3) 铺料层厚度:固定微波功率 350 W,真空度 200 Pa,考察铺料层厚度(2,4,6,8 mm)对酸菜干燥特性的影响。

1.3.3 响应面优化 在单因素试验的基础上,以微波功率、真空度和铺料层厚度为试验因素,以酸菜干样品复水比为响应值,设计三因素三水平响应面试验优化酸菜干燥工艺条件。

1.4 指标测试

1.4.1 干基含水率 按式(1)计算^[23]。

$$M_t = \frac{W_t - W}{W}, \quad (1)$$

式中:

M_t ——干基含水率,g/g;

W_t —— t 时刻对应的样品质量,g;

W ——绝干时样品质量,g。

1.4.2 干燥速率 按式(2)计算。

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

式中:

DR ——干燥速率,g/min;

M_t ——任意 t 时刻干基含水率,g/g;

$M_{t+\Delta t}$ ——干燥时间 $t + \Delta t$ 时样品的干基含水率,g/g;

Δt ——相邻两次测量的时间间隔,min。

1.4.3 复水比 取酸菜干制品约 1 g 于 300 mL 烧杯中,按料液比 1:100 (g/mL)加入蒸馏水,40℃水浴 100 min,取出沥干 10 min,用吸水纸拭干酸菜表面水分,称重,按式(3)计算复水比^[24]。

$$RR = \frac{m_2}{m_1}, \quad (3)$$

式中:

RR ——酸菜复水比, g/g ;

m_2 ——酸菜干样品复水后质量, g ;

m_1 ——酸菜干样品复水前质量, g 。

1.4.4 复水过程中水分分布的测定 将响应面优化后最佳工艺参数条件下的酸菜干样品进行复水试验, 分别复水 5, 10, 20, 40, 60 min, 吸干表面水分, 测其复水比, 并放入直径 20 mm 的核磁共振专用试管, 随后将试管放置于核磁共振系统的磁场中心位置的射频线圈中心检测, 利用核磁共振分析软件中的 CPMG 脉冲序列测定样品的自旋—自旋弛豫时间 T_2 , 得到对应的 T_2 谱图。参数设置为: 主频 21 MHz, 偏移频率 301 761.06 kHz, 采样点数 250 052, 采样频率 200.00 kHz, 采样间隔时间 2 500 ms。磁体温度 $(32 \pm 0.01) ^\circ C$, 模拟增益 20 dB, 数字增益 3 dB, 重复采样次数 2, 回波时间 0.500 ms, 回波个数 2 500。

1.4.5 数据处理 每组试验重复 3 次, 结果取平均值。运用 Origin 2017 软件对试验数据进行相关处理, 采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计、数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 微波功率对酸菜干燥特性的影响 由图 2 可知, 当微波功率分别为 50, 200, 350, 500 W 时, 酸菜干燥至终点所用时间分别为 180, 150, 120, 100 min, 其最高干燥速率分别为 0.145, 0.192, 0.213, 0.240 $g/(g \cdot min)$, 微波功率为 500 W 时的干燥时间比 50 W 时的缩短了 44.4%, 干燥速率最大值提高了 1.66 倍。说明微波功率对酸菜干燥曲线影响很大, 即微波功率越大, 干燥曲线越陡峭, 干燥时间越短, 干燥速率最高值最大, 干燥速率越快。

由图 2(b) 可知, 酸菜干燥速率曲线基本存在两个阶段: 加速阶段和减速阶段。干燥前中期, 极性分子水吸收微波, 并将微波的电磁场能转化为热能, 从而提高自身和周围物质温度, 冻结酸菜中的水分大量吸收热能, 以升华的形式被脱除。随着微波功率的增大, 单位质量酸菜吸收的微波能越多, 水分子旋转振动越剧烈, 产品热量越多, 温度升高越快, 单位时间内水分子升华越多, 干燥速率越快^[25-26]。而干燥后期, 酸菜中的水分则是以蒸发为主, 升华为辅的方式进行脱除的, 水分蒸发需要一个将液态水迁移至物料表面的过程, 且随着酸菜含水量的减少, 酸菜所吸收的微波能减少, 传质推动力下降, 干燥速率开始逐渐下降。

2.1.2 真空度对酸菜干燥特性的影响 由图 3(a) 可知, 不同真空度下, 酸菜干燥至终点所用时间基本相同, 干基含水率曲线趋势接近。对比图 2 发现, 真空度对其干基含水率和干燥速率的影响程度远小于微波功率 ($P < 0.05$)。由图 3(b) 可知, 不同真空度下酸菜干燥速率过程

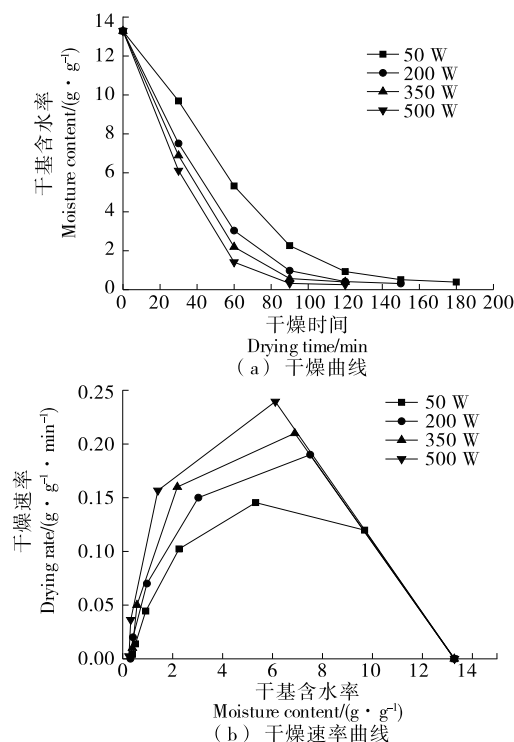


图2 微波功率对酸菜干基含水率及干燥速率的影响
Figure 2 Effect of microwave power on moisture content and drying rate of pickled cabbage

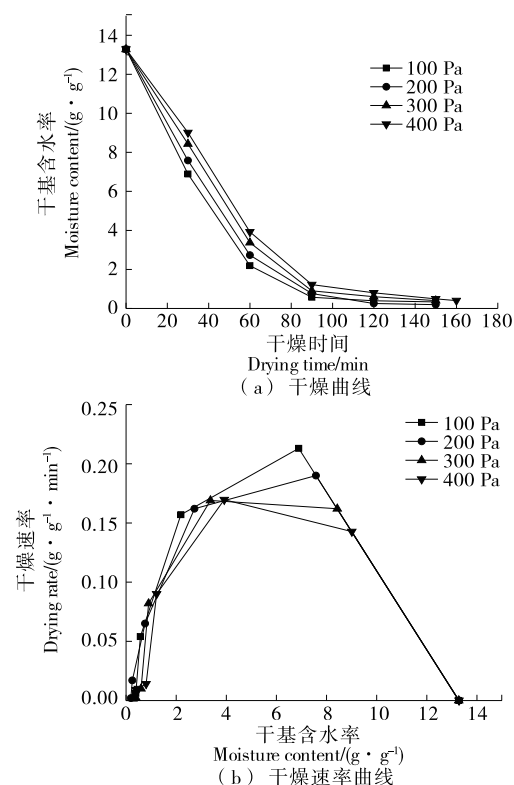


图3 真空度对酸菜干基含水率和干燥速率的影响
Figure 3 Effect of vacuum on moisture content and drying rate of pickled cabbage

主要为加速和降速阶段,恒速阶段持续时间较短。当真空度分别为 100,200,300,400 Pa 时,其最高干燥速率分别为 0.213,0.190,0.162,0.143 g/(g·min),真空度为 100 Pa 时的干燥速率最大值比 400 Pa 时提高了约 1.49 倍。干燥前期,真空度对干燥速率影响较显著,随着真空度的提高,水分子的沸点会逐渐降低,水分子是以冰晶升华为水蒸气逸出物料进而脱除的,当微波功率一定即干燥温度一定时,真空度越高,水的沸点越低,水分升华越容易,酸菜干燥速率越快。干燥中后期,干燥速率差异逐渐减小,最后基本相同。实际生产中,增大真空度能降低水的沸点,促进水分蒸发,但会增加干燥中消耗的能量,增加干制成本^[27]。

2.1.3 铺料层厚度对酸菜干燥特性的影响 由图 4(a)可知,铺料层厚度对酸菜干基含水率和干燥速率影响显著($P<0.01$),当铺料层厚度分别为 2,4,6,8 mm 时,酸菜干燥至终点所用时间分别为 120,180,270,390 min,其最高干燥速率分别为 0.213,0.125,0.060,0.052 g/(g·min)。铺料层厚度为 2 mm 时的干燥速率最大值比 8 mm 时的提高了约 4.10 倍,铺料层厚度越薄,干燥曲线越陡峭,达目标含水率所需干燥时间越短,干燥速率越大。由图 4(b)可知,不同铺料层厚度下酸菜的干燥速率过程主要为加速、匀速和降速阶段,铺料层厚度越薄,恒速干燥阶段

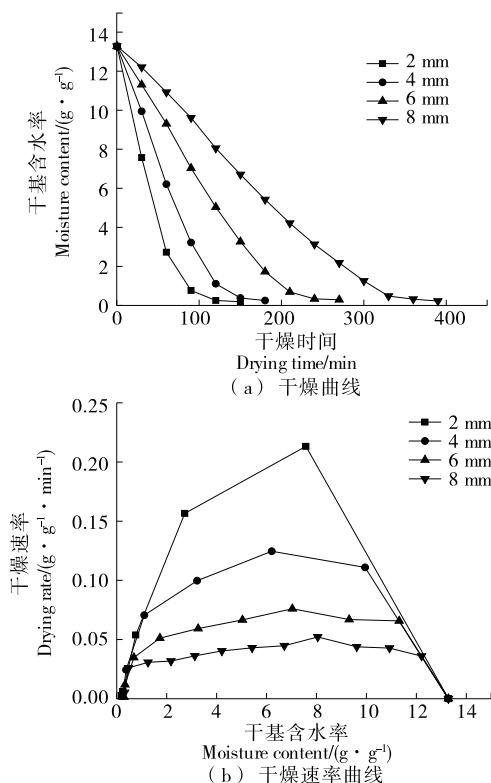


图 4 铺料层厚度对酸菜干基含水率和干燥速率的影响
Figure 4 Effect of paving layer thickness on moisture content and drying rate of pickled cabbage

持续时间越短。整个干燥过程中,随着装载量的增大,相同干基含水率所对应的干燥速率加快,这是由于铺料层厚度越薄,微波越能轻易穿透物料内部进行加热,且厚度越薄,酸菜单位体积的表面积越大,物料内部水分向外迁移通道缩短,水分扩散能力增大加快了传热速率,最终导致干燥速率增加,干燥时间缩短。

2.1.4 干燥条件对酸菜复水比的影响 由图 5(a)可知,固定真空度 200 Pa,铺料层厚度 2 mm,酸菜干制品的复水比随微波功率的增加先增加后降低,与 Krokida 等^[28]的研究结果相似。当功率从 50 W 增加至 350 W 时,酸菜干制品复水比从 8.76 g/g 提升至 9.11 g/g,但继续增加至 500 W 后,复水比反而下降至 7.62 g/g。随着微波功率的

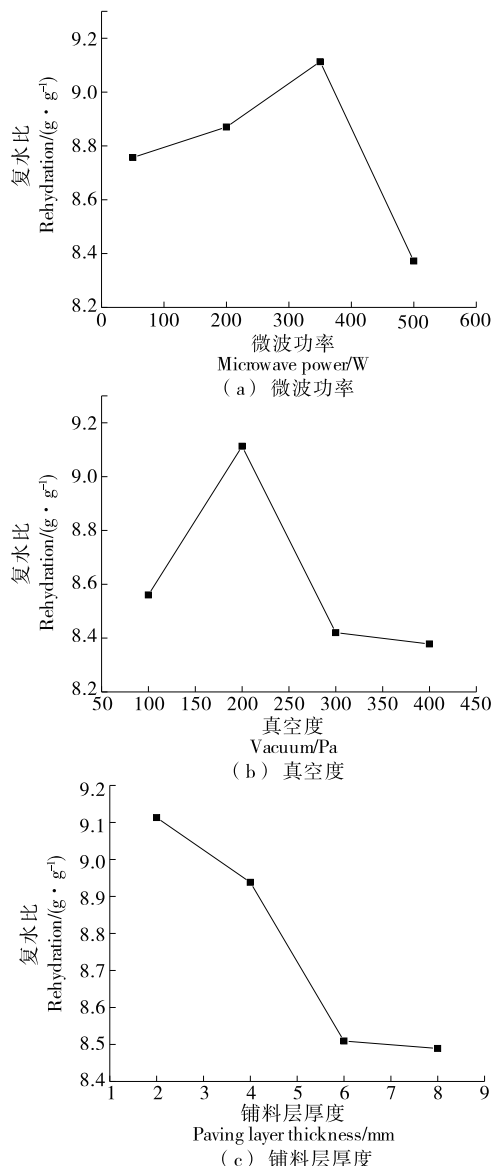


图 5 干燥条件对酸菜复水比的影响
Figure 5 Effect of different drying conditions on the rehydration ratio of sauerkraut

增加,单位质量酸菜干制品吸收的微波能增多,水分以升华的形式去除较多,干燥时间缩短,避免了水分迁移引起的应力收缩现象,酸菜干叶气孔破坏较小,较好地保存了酸菜原有的结构,复水比增加,但过大的微波功率容易导致物料升温过快,易使酸菜表面出现硬化现象,破坏组织细胞结构,酸菜干叶气孔皱缩,从而影响其复水比^[29]。

由图 5(b)可知,固定微波功率 350 W,铺料层厚度 2 mm,酸菜干制品复水比随真空度的升高先增加后减小,当真空度为 200 Pa 时达最大值 9.11 g/g。随着真空度的增加,水分的沸点及蒸发温度下降,水分蒸发速率增大,从而在较短时间内使酸菜干制品组织膨胀性增强,复水性逐渐增强,但过高的真空度容易使物料内部骨架和冰晶出现崩解和融化,组织细胞结构被破坏,复水性减弱^[29]。

由图 5(c)可知,固定微波功率 350 W,真空度 200 Pa,酸菜干制品复水比随铺料层厚度的增加而下降。铺料层厚度增加时,水分迁移途径变长,干燥时间变长,单位质量酸菜吸收的微波能减少,水分蒸发变慢,组织膨胀性减弱,复水比随之减小。铺料层厚度减小时,干燥速率加快,同时也容易形成均匀的孔隙结构,复水性较好。

2.2 响应面优化

2.2.1 响应面试验设计与结果 在单因素试验基础上,选取微波功率、真空度、铺料层厚度为主要因素,以复水比为响应值,根据 Box-Benhknen 中心组合试验设计原理进行响应面设计,试验因素与水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

2.2.2 模型的建立及方差分析 采用 Design-Expert 8.0.6 数据分析软件对表 2 中的响应值与各因素进行多元回归分析,并对模型进行方差分析。剔除不显著项后,酸菜复水比二次回归方程为:

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Experimental factors and levels used in response surface methodology

水平	A 微波功率/W	B 真空度/Pa	C 铺料层厚度/mm
-1	200	100	2
0	350	200	4
1	500	300	6

表 2 Box-Benhknen 设计与结果

Table 2 Box-Benhknen design and results

试验号	A	B	C	复水比/(g·g ⁻¹)
1	-1	0	1	8.27
2	1	0	-1	8.37
3	-1	1	0	8.01
4	0	0	0	8.98
5	1	-1	0	7.48
6	0	-1	-1	8.56
7	-1	-1	0	8.24
8	1	0	1	7.52
9	0	0	0	8.93
10	1	1	0	7.58
11	0	1	1	7.89
12	0	0	0	8.94
13	0	0	0	8.89
14	0	1	-1	8.42
15	0	0	0	9.00
16	0	-1	1	8.01
17	-1	0	-1	8.87

$$Y = 8.95 - 0.31A - 0.054B - 0.32C + 0.095AB - 0.54A^2 - 0.57B^2 - 0.51C^2.$$
 (4)

由表 3 可知,回归模型 $P < 0.000\ 1$,表明该回归模型

表 3 回归方程方差分析表[†]

Table 3 Analysis of regression equation for regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	4.590	9	0.510	135.55	<0.000 1	* *
A	0.770	1	0.770	205.21	<0.000 1	* *
B	0.023	1	0.023	6.20	0.041 6	*
C	0.800	1	0.800	213.89	<0.000 1	* *
AB	0.036	1	0.036	9.55	0.017 6	* *
AC	0.016	1	0.016	4.29	0.077 1	
BC	9.030E-005	1	9.030E-005	0.02	0.881 3	
A ²	1.210	1	1.210	322.67	<0.000 1	* *
B ²	1.380	1	1.380	367.71	<0.000 1	* *
C ²	0.099	1	0.099	26.34	0.001 4	* *
残差	0.026	7	3.760E-003			
失拟	0.019	3	6.330E-003	3.45	0.131 2	不显著
纯误差	7.34E-003	4	1.830E-003			
总差	4.620	16				

[†] * 表示差异显著($P < 0.05$), * * 表示差异极显著($P < 0.01$); $R^2 = 0.994\ 3$, $R_{adj}^2 = 0.987\ 0$, $CV = 0.73\ %$ 。

具有高度的显著性;失拟项 $P=0.131\ 2>0.05$,不显著,决定系数 $R^2=0.994\ 3$,校正决定系数 $R_{adj}^2=0.987\ 0$,表明该回归方程拟合度较好,实际值与预测值有很好的拟合相关性,可以用来对酸菜微波真空冷冻干燥工艺进行分析和预测,表明未知因素对试验结果的干扰较小。模型变异系数为 $0.73\%(<10\%)$,说明具有较好的试验稳定性,模型信噪比达 $31.068(>4)$,即该模型可用。因素 A、C、 A^2 、 B^2 、 C^2 对酸菜干制品复水比影响极显著($P<0.01$),因素 B、AB 对其影响显著($P<0.05$),因素 AC、BC 对其影响不显著。各因素对酸菜干制品复水比的影响主次关系

顺序为 $A>C>B$ 。

2.2.3 响应面分析 由图 6 可知,固定铺料层厚度为 2 mm,响应面坡度陡峭,等高线呈椭圆形,说明微波功率与真空度对酸菜干制品复水比的交互作用极显著,复水比随微波功率和真空度的增加先增大后减小,与单因素结果一致。由图 7、8 可知,微波功率与铺料层厚度交互作用较弱,而真空度与铺料层厚度交互作用不显著。

2.2.4 回归模型验证 根据回归模型计算得到最佳干燥工艺条件为微波功率 321.56 W,真空度 199.20 Pa,铺料层厚度 2.14 mm,酸菜干制品复水率为 9.14 g/g。考虑到

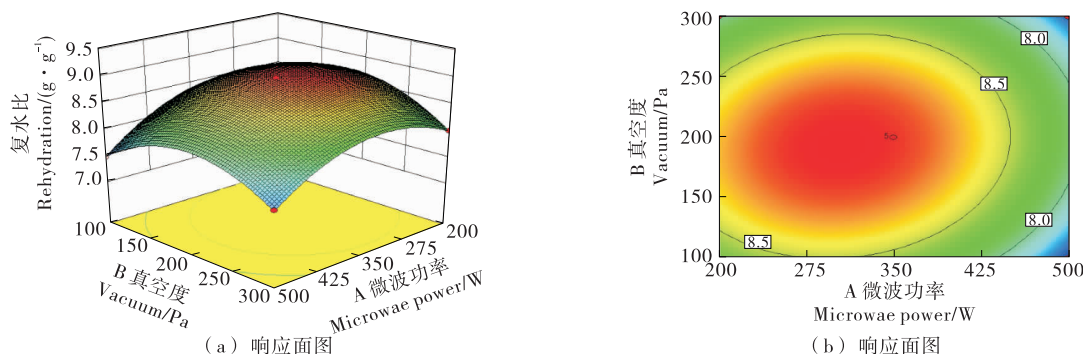


图 6 微波功率及真空度对复水比的交互影响

Figure 6 Interactive effect of microwave power and vacuum on rehydration ratio

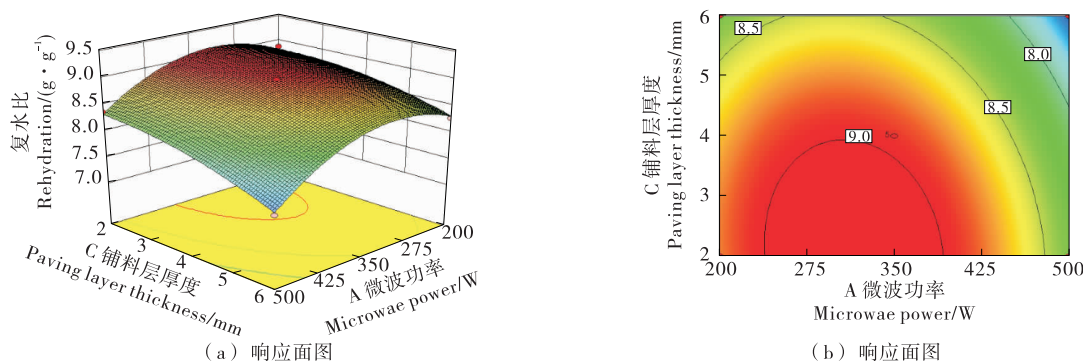


图 7 微波功率及铺料层厚度对复水比的交互影响

Figure 7 Interactive influence of microwave power and thickness of paving layer on rehydration ratio

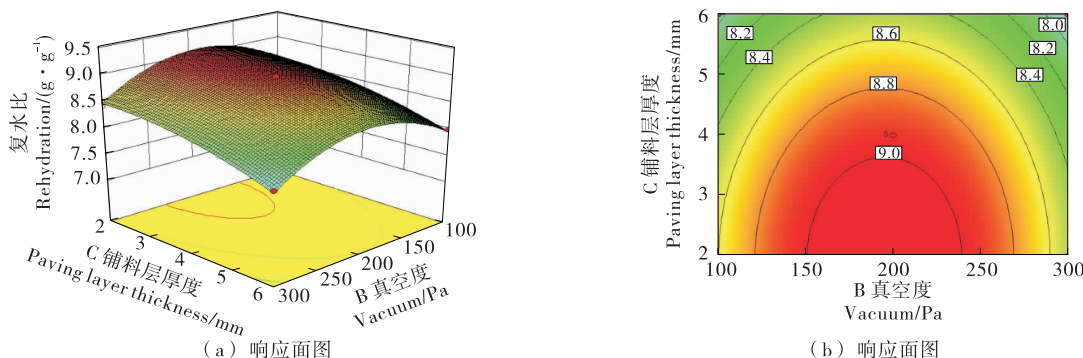


图 8 真空度及铺料层厚度对复水比的交互影响

Figure 8 Interactive effects of vacuum and paving layer thickness on rehydration ratio

实际可操作性,将工艺条件修正为微波功率 320 W,真空度 200 Pa,铺料层厚度 2 mm,为验证结果的可靠性,进行 3 次重复实验,测得平均复水率为 9.21,相对偏差为 0.76%,试验值与结果预测值接近,说明二次回归方程模型合理,试验结果较理想。

2.3 酸菜干样品复水过程中水分分布的测定

由图 9 可知,酸菜干制品复水过程中的 T_2 反演谱有 3 个峰,分别为: T_{21} (0.01~10 ms) 为结合水、 T_{22} (10~200 ms) 为不易流动水、 T_{23} (200~1 000 ms) 为自由水^[30]。复水后酸菜体内的水分主要是不易流动水而非自由水,与崔莉等^[31]研究结果一致。随着复水时间的增加,酸菜中结合水(T_{21})的信号幅度始终保持相对稳定状态,变化不大;自由水(T_{23})的信号幅度与干样品相比有所增加,但差异不明显;而不易流动水(T_{22})的信号幅度随复水的进行不断增加,其峰位置不断向右移动,表明复水过程中进入酸菜中的水很快就与酸菜细胞组织结合,并以不易流动水的形式保存在酸菜体内,复水时间越长,其信号幅度越大,H 质子所受束缚力越小,自由度越大。

由表 4 可知,随着复水时间的增加,酸菜体内结合水的峰积分面积 A_{21} 和自由水的峰积分面积 A_{23} 变化不大,不易流动水的峰积分面积 A_{22} 变化显著,增加趋势明显,峰积分面积最大。酸菜体内结合水的峰积分面积 A_{21} 随复水的进行先缓慢减小后逐渐增加, A_{21} 稳定在 20.52~54.40,说明结合水是酸菜体内最稳定的状态水,不易受外界环境的干扰;不易流动水的峰积分面积 A_{22} 变化显著,随着复水的进行逐渐增加,且在复水初期增加最快,水分转移速度最大,仅复水 5 min 的峰积分面积增加了 689.35,复水 60 min 时, A_{22} 增加至 2 153.28,表明 A_{22} 为复水后酸菜体内水分的主要存在形式,与石芳等^[32]的研究结果相似。复水后期, A_{22} 的增加速度逐渐减小,说明

表 4 酸菜复水时 3 种状态水的峰积分面积变化

Table 4 Changes of the peak integral area of three kinds of water in sauerkraut rehydration

时间/min	A_{21}	A_{22}	A_{23}
干样	22.92	2.11	—
5	20.52	691.46	23.23
10	14.63	1 013.06	27.47
20	39.35	1 514.00	59.13
40	43.93	1 861.14	106.04
60	54.40	2 153.28	113.22

酸菜复水后期吸水能力开始下降;自由水的峰积分面积 A_{23} 变化不显著,随着复水的进行有缓慢增加的趋势,可能是因为复水时间的增加导致一些自由水附着在酸菜表面,使得 A_{23} 缓慢增加,但不易被酸菜内部吸收,因此自由水的峰积分面积变化不大。

3 结论

试验表明,微波功率、真空度、铺料层厚度对酸菜干燥特性均有影响,但真空度的影响较小;微波功率越大、真空度越小,铺料层厚度越小,则酸菜干燥速率越大,曲线越陡,达干燥终点时间越短;酸菜微波真空冷冻干燥的最佳干燥工艺条件为微波功率 322 W,真空度 200 Pa,铺料层厚度 2 mm,此时复水比为 9.14 g/g;LF-NMR 试验表明不易流动水为复水后酸菜体内水分的主要存在形式;复水时间越长,不易流动水的信号幅值越大,自由度越大,结合水与自由水则变化不大。后续可针对酸菜的干燥品质、风味进行研究。

参考文献

[1] 邹慧芳, 渠畅, 吴昊, 等. 酸菜发酵过程中微生物多样性的研究进展[J]. 中国调味品, 2013, 38(11): 107-112.

[2] 张峰, 车宇博, 马利华, 等. 不同干燥方式对酸菜粉品质及抗氧化性能的影响[J]. 中国调味品, 2016, 41(11): 45-48, 53.

[3] 孟繁博, 张万萍, 吴康云. 接种发酵对酸菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 179-183, 206.

[4] 张玉龙, 胡萍, 湛剑龙, 等. 发酵酸菜的研究及其进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 3 998-4 003.

[5] KARIN Ried. Gastrointestinal health the role of pro-and pre-biotics in standard foods[J]. Aus Family Phys, 2004, 33(4): 253-255.

[6] 赵春燕, 荣向华, 张璇. 酸菜发酵液多糖提取及其抗氧化活性测定[J]. 食品科技, 2016, 41(3): 197-202.

[7] 吴兴壮, 张晓黎, 张华, 等. 沈阳市酸菜产业发展现状与建议[J]. 辽宁农业科学, 2019(4): 42-44.

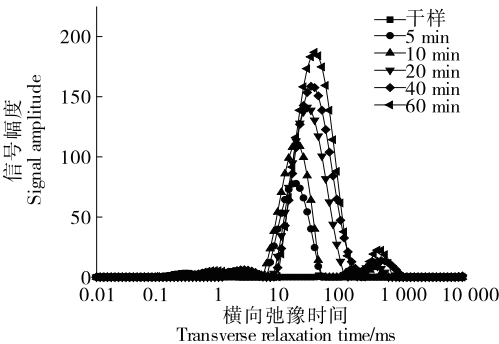


图 9 酸菜复水过程中横向弛豫时间 T_2 反演谱

Figure 9 Inverse spectrum of lateral relaxation time during pickled cabbage rehydration

- [8] 邵春霖, 孟宪军, 毕金峰, 等. 不同干燥方式对蓝莓品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 109-113.
- [9] 王画, 杨旭海, 张茜. 绿叶蔬菜干燥技术研究进展[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 88-92.
- [10] 任海伟, 赵拓, 李金平, 等. 玉米秸秆与废弃白菜混贮料的发酵特性及其乳酸菌分离鉴定[J]. 草业科学, 2015, 32(9): 1 508-1 517.
- [11] 李明珠, 冯金晓, 李辉. 内蒙古地区自制酸羊奶中乳酸菌的分离与鉴定[J]. 现代食品, 2019(2): 103-106.
- [12] 崔国艳, 陈五岭, 周美红. 激光诱变选育耐高温耐乳酸菌[J]. 中国酿造, 2012, 31(10): 153-156.
- [13] 张远志. 微波真空冷冻干燥中试装置改进探讨[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(1): 63-67.
- [14] 徐振方, 吴才章, 郭顺生. 微波真空冷冻干燥中关键技术研究[J]. 农业机械, 2011(17): 126-128.
- [15] CUI Zheng-wei, LI Chun-yang, SONG Chun-fang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips[J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1 517-1 523.
- [16] 钱草兰, 张琦, 崔政伟. 真空微波和冷冻干燥组合降低胡萝卜片的干燥能耗[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 387-392, 399.
- [17] HUANG Jia-peng, ZHANG Min. Effect of three drying methods on the drying characteristics and quality of Okra[J]. Drying Technology, 2016, 34(8): 900-911.
- [18] 卜召辉, 胡庆国, 陆宁. 真空微波与真空冷冻联合干燥金针菇的研究[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(3): 16-19.
- [19] JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 216-226.
- [20] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J/OL]. 食品科学. (2019-09-20) [2020-02-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190920.1025.023.html>.
- [21] 叶晓梦. 铁棍山药冻干—微波真空联合干燥工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 6.
- [22] DUAN Xu, LIU Wei, REN Guang-yue, et al. Comparative study on the effects and efficiencies of three sublimation drying methods for mushrooms[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2015, 8(1): 91-97.
- [23] FILIPPIN A P, LUCÍDIO M F, FADEL V, et al. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption[J]. Drying Technology, 2018, 36(14): 1 662-1 677.
- [24] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空—蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 206-210, 216.
- [25] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12-16.
- [26] 黄艳斌. 微波真空干燥对柠檬片干燥特性及品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 13-14.
- [27] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 295-302.
- [28] KROKIDA M K, MARINOS-KOURIS D. Rehydration kinetics of dehydrated products[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 57(1): 1-7.
- [29] 高若婉, 李丽, 梅树立, 等. 基于遗传算法的苦瓜片真空冷冻干燥工艺优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 401-406.
- [30] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116-123.
- [31] 崔莉, 杜利平, 闫慧娇, 等. 皱皮木瓜真空冻干工艺优化及基于 LF-NMR 技术的复水特性研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 124-133.
- [32] 石芳, 肖星凝, 杨雅轩, 等. 基于低场核磁共振技术研究不同热风干燥工艺条件下香菇复水过程中的水分传递特性[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(10): 144-149.

(上接第 76 页)

- [13] 李诗言, 王杨, 周凡, 等. 新型 QuEChERS 方法结合高效液相色谱串联四级杆飞行时间质谱法快速测定鱼肉中 14 种激素[J]. 中国渔业质量标准, 2016, 6(5): 52-59.
- [14] MARTINEZ-DOMINGUEZ G, ROMERO-GONZALEZ R, FRENICH A G. Multi-class methodology to determine pesticides and mycotoxins in green tea and royal jelly supplements by liquid chromatography coupled to Orbitrap high resolution mass spectrometry[J]. Food Chem, 2016, 197(Pt A): 907.
- [15] 杨璐齐, 李蓉, 高永清, 等. UPLC-Q-Orbitrap HRMS 同时检测水产品中磺胺和喹诺酮类药物残留[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 38-43.
- [16] 李涛, 杨潇, 孙桂芳, 等. QuEChERS-UPLC-Q/Orbitrap MS 法快速测定草鱼中 14 种糖皮质激素类药物残留[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 100-104.
- [17] 洪灯, 谢文, 侯建波, 等. 高效液相色谱—四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱法快速筛查保健食品中的西布曲明及其 5 种衍生物[J]. 色谱, 2019, 37(11): 1 173-1 178.
- [18] 张科明, 梁飞燕, 邓鸣, 等. QuEChERS 结合液相色谱—串联质谱法快速测定猪肉中多类兽药残留[J]. 色谱, 2016, 34(9): 860-867.