

涂膜-超声复合预处理强化苹果片干燥特性及其品质提升

王润楠¹, 赵丹丹¹, 黄金¹, 郝建雄¹, 韩雪¹, 胡高爽¹, 饶欢¹, 关军锋²

(1. 河北科技大学生物科学与工程学院, 河北石家庄 050018)

(2. 河北省农林科学院遗传生理研究所, 河北石家庄 050051)

摘要: 本文以苹果为原料, 为提高热风干燥速率, 改善产品品质, 通过研究不同功率下(0、160、320、480 W)超声和羧甲基纤维素涂膜复合预处理对苹果片热风干燥特性(干基含水量和干燥速率)及产品品质(总酚、颜色、DPPH清除率、复水比、微观结构)的影响, 为其它产品干燥提供研究依据。在60~90℃干燥条件下, 苹果片的干燥速率、总酚含量、DPPH清除率、复水比均随着超声功率增大而增大, 干燥时间、色差随超声功率增大而减少。在70℃、480 W条件下, 可获得较高的干燥速率和较好的干燥品质, 干燥时间为150 min, 总酚含量为16.25 mg GAE/g DW, 色差值 ΔE 为8.13, DPPH清除率为38.15%, 复水比达5.23, 用电子显微镜对苹果干制品进行观察微观结构, 可以发现经超声处理后的干制品内部的褶皱多、微孔通道较多。综上, 涂膜-超声复合预处理能够缩短干燥时间, 提高干燥速率, 提高产品的总酚含量、DPPH清除率和复水比, 改善干制品色泽。

关键词: 苹果; 干燥动力学; 超声; 涂膜; 总酚; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2020)10-226-235

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.0221

Pretreatment of Apple Slices using Coating-Ultrasound before Hot Air Drying to Enhance Drying Characteristics and Quality

WANG Run-nan¹, ZHAO Dan-dan¹, HUANG-jin¹, HAO Jian-xiong¹, HAN Xue¹, HU Gao-shuang¹, RAO Huan¹, GUAN Jun-feng²

(1. School of Biological Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(2. Institute of Genetics and Physiology, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The experiment used apples as materials, in order to improve the hot air drying rate and quality of dried products. In this paper, carboxymethyl cellulose (CMC) coating film and pretreatment with different ultrasonic powers (0, 160, 320, 480 W) were used to study the hot air drying characteristic curve (water content of dry base and drying rate) and quality (total polyphenol and color difference, DPPH removal rate, rehydration rate and dried microstructure) of apple slices. Under the drying condition of 60~90℃, the increase of ultrasonic power led to the increases of drying rate, total polyphenol, DPPH removal rate and the rehydration ratio, while the drying time and color difference(ΔE) decreased with the increase of ultrasonic power. At 70℃ and 480 W, a higher drying rate and better drying quality could be obtained, the drying time of drying apple slices is 150 min, the total phenol content is 16.25 mg GAE /g DW, the ΔE is 8.13, the DPPH scavenging rate is 38.15%, and the rehydration ratio is 5.26. The microstructure of dried apple products after ultrasonic pretreatment could be

引文格式:

王润楠,赵丹丹,黄金,等.涂膜-超声复合预处理强化苹果片干燥特性及其品质提升[J].现代食品科技,2020,36(10):226-235

WANG Run-nan, ZHAO Dan-dan, HUANG-jin, et al. Pretreatment of apple slices using coating-ultrasound before hot air drying to enhance drying characteristics and quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 226-235

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (G2019208315); 河北省农林科学院创新工程项目 (2019-2-1)

作者简介: 王润楠 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬干燥

通讯作者: 赵丹丹 (1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬干燥与加工

observed by using an electron microscope, and it could be found that there are many folds and microspore channels. Overall, the combined application of ultrasonic and CMC coating pretreatments could shorten the drying time, improve the drying rate and total polyphenol content, DPPH scavenging rate, rehydration ratio of the products, and strengthen the quality of the dried apple slices.

Key words: apple; drying kinetics; ultrasonic; coating; total polyphenol; antioxidant

苹果, 属于蔷薇科苹果亚科苹果属植物。苹果是一种低热量的水果, 富含丰富的维生素和微量元素, 因其营养成分含量较高, 且容易被人体吸收, 是人们喜爱食用的水果之一^[1]。苹果干燥通常采用热风干燥^[2]、微波干燥^[3]、远红外线干燥^[4]、真空冷冻干燥^[5]等几种方法。其中, 热风干燥因其操作简单, 成本低, 产量大, 因此在我国90%以上企业采用热风干燥工艺。

超声波是声波的一种, 频率大于20 kHz。利用超声波预处理能强化物料的干燥过程, 因为超声波能和超声过程中的介质发生相互作用, 产生热效应、机械效应和空化效应, 三种效应对产品的影响在后续干燥过程中产生作用。孙宝芝^[6]等人用苹果和梨做原料, 比较了自然的渗透脱水与超声的方法下脱水的速度, 结果表明, 超声空化效应对渗透脱水有明显的促进作用。将超声波应用于预干燥阶段, 再与热风干燥方式相结合, 可降低热风干燥温度, 减少耗能^[7], 提高热风干燥效率, 有利于营养成分的保留^[8]。

涂膜不仅有保鲜的作用, 把涂膜剂涂抹在果蔬的外面, 还能起到抗氧化的作用^[9]。涂膜剂大多是用天然的可食性蛋白质、多糖和脂肪进一步加工而制成的。在本次实验中选用了涂膜剂中稳定性比较好的羧甲基纤维素(Carboxymethyl Cellulose, 简称CMC)作为成膜剂的主成分, 因为羧甲基纤维素具有很好的成膜特性^[10]。在苹果片干燥前进行涂膜的预处理, 可对苹果成分中的热敏物质起到保护作用, 防止营养成分被破坏, 提高苹果的营养物质成分保留率^[11]。目前有对香蕉、杏干进行超声和涂膜预处理的实验研究, 但是涂膜材料不同, 还有利用超声复合涂膜的方式对竹笋保鲜的研究, 随着农产品加工的不断推进, 多方法的研究也在不断进行, 所以, 研究涂膜-超声对苹果片的热风干燥的影响是一个新的研究方向。

为了探索高效保质的果蔬干燥方式, 本文以苹果为原料, 研究不同超声功率下涂膜-超声复合预处理对苹果片的热风干燥特性(干基含水量和干燥速率)及产品品质(总酚、颜色、抗氧化性和微观结构等)的影响, 预期为果蔬干燥的提质增效提供研究思路与参考。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

市售烟台红富士苹果, 购于超市, 选择直径为 9.60 ± 2 cm的苹果, 于4℃保藏备用。甲醇, 天津市富宇精细化工有限公司; 无水乙醇, 石家庄新宇三阳实业有限公司; 无水碳酸钠(化学纯), 天津博迪化工股份有限公司; 硫酸亚铁, 天津市永大化学试剂有限公司; 还原铁粉, 天津市恒兴化学试剂制造有限公司; 水杨酸(化学纯), 天津博迪化工股份有限公司; 没食子酸, 天津市光复精细化工研究所; 无水柠檬酸(食品级), 广东味多美食品配料有限公司; 羧甲基纤维素(methyl cellulose CMC)(柱层析), 源叶生物; 30%双氧水, 成都市科龙化工试剂厂; 福林酚试剂, 天津化学试剂有限公司; 浓硫酸, 天津市风船化学试剂科技有限公司; 所有分离用有机溶剂均为国产分析纯。

1.2 主要仪器设备

BC/BD-146HCD 低温冷冻冰柜, 青岛海尔特种电冰柜有限公司; GL-20G-H 高速冷冻离心机, 上海安亭科学仪器厂; MDF-382E 恒温培养箱, 上海-恒科仪器有限公司; KS-800KDE 高功率液晶超声波清洗机, 昆山洁力美超声仪器有限公司; FSJ302-5 高速万能粉碎机, 天津市泰斯特仪器有限公司; CR-400 色彩色差计, 苏州新美和仪器有限公司; S/N601-1037 酶标仪, 江苏万科科教仪器有限公司; DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司、太仓精宏仪器设备有限公司; TM3000 电子显微镜, 上海利蛟实业有限公司; MS-PB 磁力搅拌器, 大龙兴创实验仪器(北京)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理

选择直径为 9.60 ± 2.00 cm苹果进行清洗。将干净的苹果用圆形模具切成半圆柱, 利用模具再将其切成 5.00 ± 0.50 mm半环状片。为了防止苹果片在空气被氧化褐变, 使其在质量分数为1.50%的柠檬酸溶液中浸泡(5 s, 物料重量与护色液体积比为1:2, g:mL), 达到护色的目的。

1.3.2 CMC涂膜溶液的制备和超声预处理

用 80 ℃ 的去离子水溶解羧甲基纤维素, 将 CMC 缓慢的加入到水中, 边搅拌边溶解, 直至得到透明溶液。羧甲基纤维素膜溶液的质量分数为 0.50%, 苹果片重量与涂膜液体积比为 1:2, g/mL。使苹果片均匀浸没在涂膜液中, 选取 4 个不同的超声功率进行预处理, 超声功率依次为 0、160、320 和 480 W。将浸泡苹果片的烧杯放入超声仪器中, 在超声温度为 35 ℃、超声时间为 10 min 条件下进行超声。超声结束后将苹果片从涂膜溶液中取出, 将苹果片表面的涂膜溶液用滤纸轻轻擦拭除去。

1.3.3 热风烘干

将预处理后的苹果片平摆在长方形带孔塑料盘中, 放入热风烘箱中干燥, 干燥温度分别为 60、70、80 和 90 ℃。在干燥过程中, 使用数字天平称量, 每 15 min 测一次样品的水分变化, 直到样品达到的恒重状态(两次测量值之差不超过 2 mg)停止干燥。将干燥后的样品放入自封袋中密封保存备用。

1.3.4 干燥动力学

1.3.4.1 干燥动力曲线

参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》直接干燥法^[12]测定。用热风烘箱测定苹果片的干基含水量, 计算公式如下:

$$MC = \frac{W_t - [W_0 \times (1 - M_t)]}{[W_0 \times (1 - M_t)]}$$

式中: MC : 苹果片的干基含水量 (g 水/g 干物质); W_t : t 时苹果片重量 (g); W_0 : 苹果片初始重量 (g); M_t : 苹果片的湿基含水量。

干基含水量 (MC , g H₂O/g 干基) 是以绝对干物料为基准的湿物料中含水量, 湿基含水量 (M_t , g H₂O/g 湿基) 是以湿物料为计算基准的物料中水分的质量分数或质量百分数, 二者的换算公式为:

$$MC = \frac{M_t}{1 - M_t} \times 100\%$$

苹果片在干燥过程当中的干燥速率[kg 水/(kg 干基·h)], 计算公式如下:

$$DR = \frac{MC_t - MC_{t+\Delta t}}{\Delta t \times 60}$$

式中: DR : 苹果片的干燥速率[kg 水/(kg 干基·h)]; MC_t : t 时苹果片的干基含水量 (g); $MC_{t+\Delta t}$: $t+\Delta t$ 时苹果片的干基含水量 (g); Δt : 时间差 (min)。

通过计算之后能够绘出苹果片在干燥过程当中的干基含水量随干燥时间变化的曲线, 以及苹果片的干燥速率随干基含水量变化的曲线。

1.3.4.2 MR

在干燥过程, 物料水分比 (MR , 无量纲) 计算方

式^[13]如下:

$$MR = \frac{MC_t}{MC_0}$$

式中: MC_t 为 t 时刻的干基含水量, g H₂O/g 干基; MC_0 为初始时刻的干基含水量, g H₂O/g 干基。

1.3.4.3 干燥模型-Weibull 分布函数

Weibull 分布函数^[14]计算方式如下表示:

$$MR = \exp[-(\frac{t}{\alpha})^\beta]$$

式中: α 表示苹果片干燥过程中的速率常数, h; β 表示形状参数, 该值与物料在干燥过程中开始阶段的传质速率有关, 其值越小表示开始的干燥速率越大。

按照 Weibull 分布函数对 MR 与 t 进行非线性拟合, 可以用决定系数 (R^2) 检验数学模型与实验数据的匹配程度, R^2 越接近 1 说明模型的匹配度越高。

1.3.4.4 有效扩散系数估算

Weibull 分布函数可以用来估算干燥过程的水分扩散系数 (Calculated moisture diffusion coefficient, D_{cal}), 并且不考虑水分迁移特点, 计算方式如下:

$$D_{cal} = \frac{L^2}{\alpha}$$

式中: D_{cal} 为干燥过程估算的水分扩散系数, m²/s; L 为苹果的当量传质厚度, 取苹果片厚度的一半, 为 0.0025 m; α 即枸杞干燥过程中的速率常数, h。

1.3.5 总酚的测定

1.3.5.1 总酚的提取

参考王琴^[15]等人的方法, 并稍作改动。总酚的提取采用有机溶剂-超声辅助提取方法。将干燥后的苹果片用打粉机 (FSJ302-5) 打成粉, 并过筛 (30 目)。在离心管中加入过筛后的粉 0.32 g, 然后加入 80% 的甲醇 8 mL, 混和均匀后, 在超声温度 30 ℃ 下超声 30 min, 随后在 4 ℃、10000 r/min 下冷冻离心 10 min, 收集上清液。上述步骤重复 2 次, 最后用 80% 的甲醇溶液将溶液定容至 50 mL 容量瓶中, 随后转入 50 mL 离心管中, 用密封条密封, 在 4 ℃ 中保存备用待测。

1.3.5.2 没食子酸标准曲线的测定

首先配制 1 mg/mL 的没食子酸母液。然后分别稀释到浓度为 10、20、40、60、80、100 和 120 μg/mL 的没食子酸溶液。分别取各浓度溶液 0.40 mL, 与 2 mL 稀释 10 倍的福林酚试剂、3 mL 浓度为 10% 的 Na₂CO₃ 溶液, 混合均匀后, 避光反应 2 h。最后取 200 μL 于 96 孔酶标板中, 每个样品放 3 个孔, 用酶标仪 (S/N601-1037) 检测其在 765 nm 下吸光值, 绘制没食子酸标准曲线。实验测得的没食子酸的标准曲线是: $y=0.002x-0.005$ (相关系数 $R^2=0.993$), 其中 y 值代表

吸光值, x 代表没食子酸浓度, $\mu\text{g/mL}$ 。

1.3.5.3 样品中总酚含量的测定

参考梅进^[16]等人的方法, 并稍作改动。在 10 mL 离心管中加入总酚提取液 0.40 mL, 依次加入 2 mL 稀释 10 倍的福林酚试剂、3 mL 浓度为 10% 的 Na_2CO_3 溶液。混合均匀后, 避光反应 2 h, 用酶标仪 (S/N601-1037) 检测其在 765 nm 下的吸光值。总酚的含量用 mg 没食子酸当量/g 样品干基表示。

1.3.6 DPPH 清除率的测定

参考 Liu^[17]等人的方法, 并稍作改动。10 mL 离心管中加入 0.80 mL 的样品提取液, 然后加入 5 mL 0.20 mmol/L 的 DPPH 自由基溶液。避光下反应 30 min, 用酶标仪在 517 nm 下检测其吸光值。计算公式如下:

$$S_1 = \frac{[A - (B - B_0)]}{A} \times 100\%$$

式中: S_1 : DPPH 清除率; A : 用样品提取液溶剂 80% 甲醇代替样品提取液的吸光值; B : 样品提取液吸光值; B_0 : 用 DPPH 溶液的溶剂 (80% 甲醇) 代替 DPPH 溶液的吸光值。

1.3.7 色差

使用色彩色差计 (CR-400) 测量样品的颜色变化。选择鲜果的苹果片和干燥后的苹果片进行测量, 测量时每种处理方式下随机选择 3 个苹果片, 并均匀选择至少苹果片的 6 个点使用 L^* 、 a^* 和 b^* 颜色参数对其颜色进行测量。 L^* 颜色参数表示黑暗, a^* 颜色参数表示红绿, b^* 颜色参数表示黄蓝。为了形容干燥过程中的颜色变化, 以鲜果为对照, 计算了干燥后样品和鲜果切片之间的总色差 (ΔE)。计算公式如下:

$$\Delta E = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{0.5}$$

1.3.8 复水比

参考 Wang^[18]等人的方法, 稍作改动。为了测量样品复水率, 在室温下, 将样品放入去离子水中, 每 5 分钟称量一次其重量变化, 直到其达到恒重绘制出复水曲线, 计算复水比公式如下:

$$R = \frac{m_t}{m_0}$$

式中: R : 复水比; m_t : t 时样品的重量; m_0 : 样品复水前的重量。

1.3.9 扫描电镜 (SEM)

通过观察微观结构能够看出样品内部结构在不同条件下处理的变化。本次实验通过电镜 (TM3000) 在 5 kV、4000 倍下观察其横截面图像。

1.4 数据分析

本次实验数据均用 Excel-2010 处理, 绘图使用 Origin 9.0, 显著性差异分析使用 SPSS 20.0 (Duncan 法, $p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 干燥动力学

表 1 不同预处理条件下苹果片的湿基含水量

Table 1 Wet-based moisture content of apple slices under different treatment conditions

不同预处理条件	湿基含水量/%
直接干燥	87.75 ^c
0 W 涂膜	88.93 ^b
160 W 涂膜	90.25 ^a
320 W 涂膜	90.10 ^a
480 W 涂膜	90.55 ^a

注: 字母不同表示显著性差异 $p < 0.05$ 。

对不同干燥条件下的苹果片的水分比随时间的变化曲线进行 Weibull 分布函数非线性拟合, 结果如表 2 所示, 可以看出, 决定系数 R^2 在 0.9939~0.9987 之间, Weibull 分布函数能很好的模拟苹果片的热风干燥曲线, 形状参数 β 值均大于 1, 表示物料在干燥前期存在延滞阶段 (lag phase), 即在干燥前期出现干燥速率先升高而后降低的形态。

由函数可知, 随着干燥的进行, 物料的含水量逐渐降低。Otoniel Corzo^[19]报道, 尺度参数 a 大小为干燥至终点还需要全部干燥过程时间的 63% 左右, 能够反映干燥过程所需时间长短。在本实验中, 对于同一种预处理条件下的物料, 随着温度升高, 其尺度参数 a 逐渐降低, 说明其干燥所需时长逐渐降低, 这与实验所得干燥总时长结果一致。在超声功率 480 W 时, 干燥温度 90 °C 所需的干燥时间 80 min, 与 60 °C 所需的干燥时间 180 min 相比来说, 缩短了 55.56%。因为温度的升高有利于水分的扩散蒸发, 加快了干燥过程。同时, 由表 2 可知, 随着干燥温度的提高, 其估算的有效扩散系数呈现升高的趋势。

整体上来说, 超声预处理能够提高干燥效率, 缩短干燥时间, 且超声功率越大, 干燥时间越短。例如在 80 °C 下, 超声功率为 480 W 条件下样品所需的干燥时间为 120 min, 与直接干燥所需时间 140 min 相比缩短了 14.29%, 这是因为在超声波的作用下, 产生了空化效应, 苹果片的内部形成更多的微孔通道, 导致内部的水分容易扩散到外表层, 从而在高温下干燥易被除去。Fernandes Fabiano A N^[20]等人对新鲜的菠萝片超声处理后再进行热风干燥, 发现经过超声处理的样

品, 水分扩散系数增加, 干燥时间相比直接干燥样品缩短了 31%, 同样也表明了联合处理不仅能使干燥过

程当中的水分扩散系数增加, 还能缩短干燥的时间。

表 2 Weibull 分布函数模拟结果、干燥时间及有效扩散系数估算值

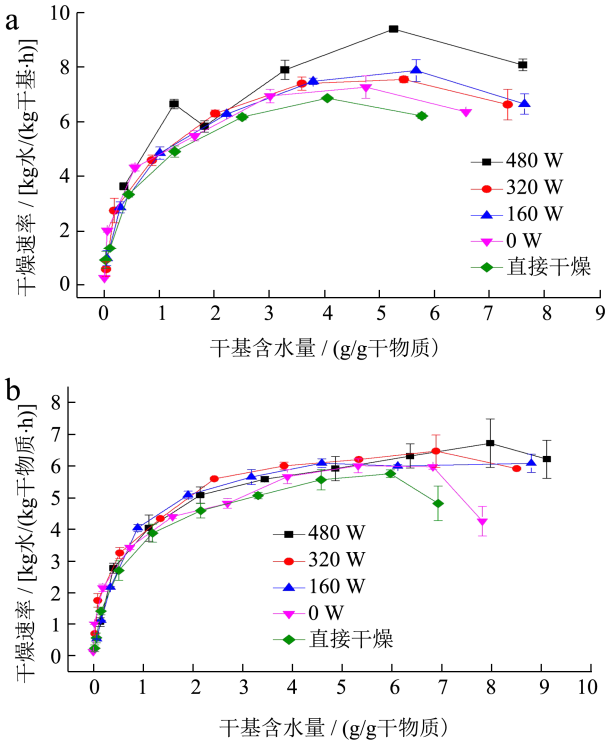
Table 2 Weibull distribution function simulation results, drying time and effective diffusion coefficient estimates

超声功率/W	干燥温度/℃	Weibull 函数	决定系数 R ²	干燥时间/min	D _{cal}
直接干燥	60	$MR=\exp(-(t/1.36)^{1.43})$	0.9977	200	1.28×10^{-7}
	70	$MR=\exp(-(t/0.96)^{1.45})$	0.9950	163	1.81×10^{-7}
	80	$MR=\exp(-(t/0.83)^{1.50})$	0.9964	140	2.09×10^{-7}
	90	$MR=\exp(-(t/0.69)^{1.57})$	0.9987	95	2.52×10^{-7}
0	60	$MR=\exp(-(t/1.35)^{1.51})$	0.9962	213	1.29×10^{-7}
	70	$MR=\exp(-(t/1.09)^{1.45})$	0.9969	190	1.59×10^{-7}
	80	$MR=\exp(-(t/0.89)^{1.54})$	0.9955	135	1.95×10^{-7}
	90	$MR=\exp(-(t/0.73)^{1.62})$	0.9961	105	2.38×10^{-7}
160	60	$MR=\exp(-(t/1.35)^{1.50})$	0.9951	195	1.29×10^{-7}
	70	$MR=\exp(-(t/1.16)^{1.51})$	0.9961	175	1.50×10^{-7}
	80	$MR=\exp(-(t/0.90)^{1.51})$	0.9951	135	1.93×10^{-7}
	90	$MR=\exp(-(t/0.78)^{1.60})$	0.9970	105	2.23×10^{-7}
320	60	$MR=\exp(-(t/1.33)^{1.47})$	0.9955	180	1.31×10^{-7}
	70	$MR=\exp(-(t/1.18)^{1.52})$	0.9962	170	1.47×10^{-7}
	80	$MR=\exp(-(t/0.88)^{1.56})$	0.9950	115	1.97×10^{-7}
	90	$MR=\exp(-(t/0.76)^{1.61})$	0.9965	105	2.28×10^{-7}
480	60	$MR=\exp(-(t/1.35)^{1.50})$	0.9939	180	1.29×10^{-7}
	70	$MR=\exp(-(t/1.03)^{1.46})$	0.9961	150	1.69×10^{-7}
	80	$MR=\exp(-(t/0.93)^{1.50})$	0.9954	120	1.87×10^{-7}
	90	$MR=\exp(-(t/0.69)^{1.57})$	0.9987	80	2.52×10^{-7}

如图 1 所示, 四种干燥温度下, 不同处理方式的苹果片的干燥速率随着干基含水量的变化曲线, 可知整个干燥过程分为恒速和降速两个阶段, 当苹果片的干基含水量大于 1.0 g H₂O/g 干基时, 物料基本处于恒速干燥阶段, 此时, 物料主要除去的是自由水, 物料表面水分蒸发与内部水分扩散保持平衡, 当含水量低于转折点时, 物料内部大部分自由水被除去, 而结合水开始蒸发, 并且物料内部水分扩散处于主导地位。所以, 在干燥后期物料干燥速率迅速降低直至稳定, 干燥过程结束。

随着超声功率的增加, 物料的干燥速率增大。在 70℃ 时, 超声功率为 480 W 时样品的初始干燥速率为 9.15 kg 水/(kg 干基·h), 与直接干燥的初始干燥速率 7.12 kg 水/(kg 干基·h)相比增加了 28.51%。这是因为超声产生的空化效应, 打开了苹果片的内部水分通道, 使得水分在干燥传质过程中扩散变快, 超声功率增大, 产生的空化效应越强, 干燥效果越好。赵芳^[21]等人的研究表明当超声波强度为 1.0 W/cm² 时, 相比无超声波作用的样品干燥速率提高了 67.2%, 说明超声强度的

增大, 样品的干燥过程被强化, 干燥速率增大。



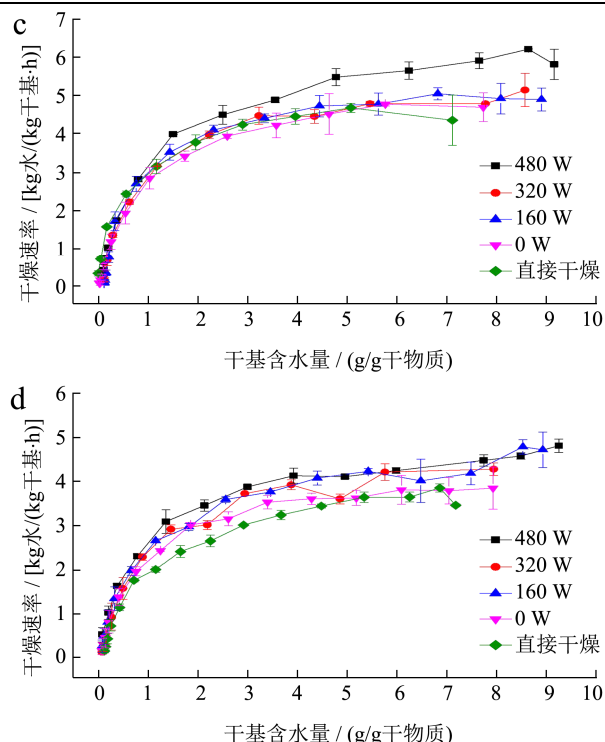


图1 苹果片干基含水量-干燥速率变化

Fig.1 Variations of drying rate of apple slices dry basis water content

注: a: 90 °C; b: 80 °C; c: 70 °C; d: 60 °C。

孙畅莹^[22]等人利用超声强化梨片的热风干燥过程,发现超声功率为48 W与直接干燥的样品相比,所需的干燥时间缩短了58.30%,干燥温度越高,水分的内部扩散和表面蒸发越快,干燥速率增强,从而使干燥时间变短。只涂膜的样品干燥时间较长,是因为在样品表面存有膜溶液,形成了一层保护膜,阻碍了水分的逸出。所以,在干燥过程中,超声预处理功率越大,干燥温度越高,干燥速率也会越高,干燥的时间则会缩短。

2.2 总酚含量

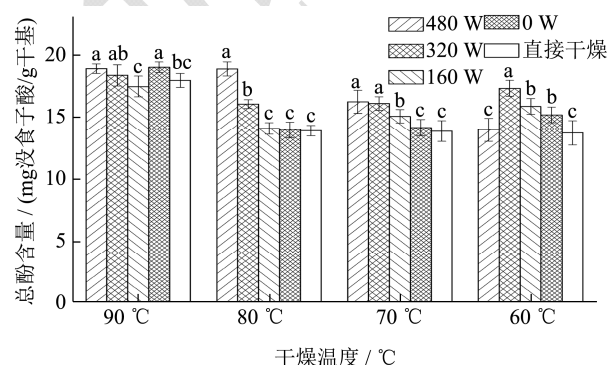


图2 涂膜-超声复合处理和温度对干苹果片总酚类含量的影响
Fig.2 Effects of the ultrasonic power and temperature on the total phenolic content of the dried apple slices

注: 柱体上小写字母不同表示显著性差异 $p < 0.05$, 下同。

如图2所示,在四种干燥温度下,不同的涂膜-超声预处理方式所得干制品的总酚含量。经过超声和涂膜复合处理之后的干制品,总酚含量要高于直接干燥后的干制品的总酚含量。苹果富含多酚,在加热过程中容易发生氧化、降解等反应。

实验表明,提高温度和增大超声功率有助于提高干制品的总酚含量。在超声功率为480 W时,90 °C下样品的总酚含量为18.93 mg 没食子酸当量/g 样品干基,与80 °C总酚含量18.91 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了0.1%,与70 °C总酚含量16.25 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了16.50%,与60 °C总酚含量13.96 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了35.60%;在干燥温度为70 °C时,超声功率为480 W样品的总酚含量为16.25 mg 没食子酸当量/g 样品干基,与超声功率320 W的样品总酚含量16.11 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了0.9%,与超声功率160 W的样品总酚含量15.07 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了7.8%,与超声功率0 W的样品总酚含量14.14 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了14.92%,与直接干燥的样品总酚含量13.86 mg 没食子酸当量/g 样品干基相比增加了17.24%。一方面,这可能是因为高温下,酶促褐变受到抑制;另一方面,在高功率的超声下,能够提高干燥速率,缩短干燥时间,减少了酚类物质受热的时间,同时由于超声使空穴作用增强,水分快速蒸发,降低了水分活度,使酚类物质反应条件受限,保护了像酚类等这样的热敏物质。除此之外,涂膜处理也能保护热敏物质,防止热敏物质的挥发,从而提高了总酚含量。90 °C下总酚含量没有显著变化可能是因为此时干燥温度的影响占主要因素,高温导致酚类氧化酶失活,所以总体的总酚含量没有显著变化。

Óscar Rodríguez^[23]等人发现了经过超声波-热风干燥结合的处理以后,发现苹果片在干燥温度分别为30 °C、50 °C和70 °C时,70 °C下的总酚含量损失最低。在朱翠平^[24]对牛蒡脆片的研究中也表明,经过超声预处理组的样品总酚、总黄酮含量高,因为超声波能钝化多酚氧化酶,从而增加总酚含量。

2.3 DPPH 清除率

如图3所示,在四种干燥温度下,不同的涂膜-超声预处理方式所得干制品的DPPH清除率变化。在不同干燥温度下,大部分涂膜-超声复合预处理所得样品比直接干燥的样品DPPH清除率大。在超声功率为480 W时,干燥温度80 °C下样品的DPPH清除率为

51.85%，与 90 °C 时相比增加了 14.43%，与 70 °C 时相比增加了 35.91%，与 60 °C 时相比增加了 43.55%；80 °C 下 480 W 超声处理的样品的 DPPH 清除率最高，可达 51.85%。因为温度过高会使抗氧化物质在高温下氧化分解；温度低，样品干燥时间长，抗氧化物质分解，导致抗氧化性降低，这与刘冬^[25]的研究也是一致的。在干燥温度为 70 °C 时，超声功率为 480 W 样品的 DPPH 清除率为 38.15%，与 320 W 时相比增加了 38.53%，与 160 W 时相比增加了 15.82%，与 0 W 时相比增加了 17.60%，与直接干燥的样品相比增加了 17.24%。

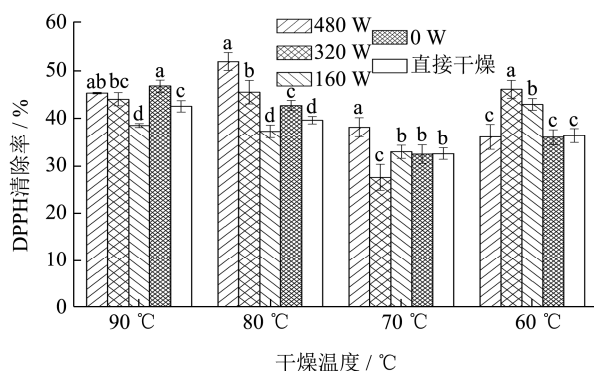


图3 涂膜-超声复合处理和温度对干苹果片 DPPH 清除率的影响

Fig.3 Effects of the ultrasonic power and temperature on the DPPH removal rate of the dried apple slices

除 90 °C 外，可以看出增大超声功率，DPPH 清除率增加，这是因为涂膜-超声复合处理缩短了干燥时间，减少热敏物质在空气中的暴露时间，保护热敏物质。90 °C 下的清除率变化不大，可能是因为酚类含量的变化不明显。大部分涂膜之后的干制品相比于直接干燥后的干制品的 DPPH 清除率高，因为涂膜能够阻挡气体的交换，降低抗氧化物质的氧化反应。

除此之外，DPPH 清除率的变化基本是随着总酚含量的变化而变化，结合总酚和 DPPH 清除率的变化，涂膜-超声处理的样品从整体上来看，在 80 °C、70 °C、60 °C 下均呈现较相关的状态；相对于其它干燥温度，90 °C 时总酚含量最高，但是 DPPH 清除率不是最高，这可能是因为在样品溶液中一些其它的辅助抗氧化性物质在 80 °C 以上会被氧化或失活，例如维 C 等物质，所以导致 DPPH 清除率会略显下降。在干燥温度为 90 °C 时，涂膜-超声样品的总酚含量与 DPPH 清除率变化是相同的，说明在苹果干中的总酚类物质起主要的抗氧化作用。

2.4 总色差

如图 4 所示，在四种干燥温度下，不同的涂膜-

超声预处理方式所得干制品的色差变化。涂膜-超声复合处理的样品随干燥温度的降低，色差值呈现先降低后升高的趋势，直接干燥的样品呈现先升高后降低的趋势，涂膜-超声复合处理的样品在 70 °C 下所得干制品的色差值最小，与直接干燥样品相比，颜色变化最大。在超声功率为 480 W 时，70 °C 下样品色差值为 8.13，与 90 °C 下色差值 11.92 相比降低了 31.80%。苟小菊^[26]等人也表明在高温下的颜色变化要比低温下的颜色变化大，这是因为，高温下虽然能够抑制酶促褐变，但随着温度升高，会促进苹果片的内部的非酶褐变反应，产生褐色物质，进而导致产品色差变大。

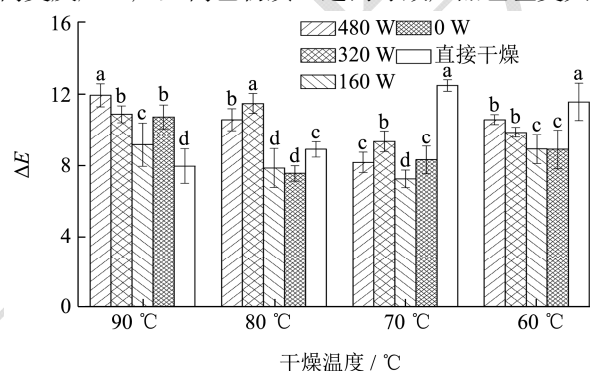


图4 涂膜-超声复合处理和温度对干苹果片颜色的影响

Fig.4 Effects of the ultrasonic power and temperature on total color difference change of the dried apple slices

在 60 °C 和 70 °C 热风干燥条件下，涂膜-超声处理所得的样品的色差值小于直接干燥的样品，同时整体上小于其他干燥条件下的产品。其中在 70 °C、160 W 时色差值为 7.20，480 W 时为 8.13，均与直接干燥的样品色差值 12.47 有显著性差异 ($p < 0.05$)。有研究^[27,28]也曾表明，涂膜后的苹果片受到膜的保护作用，使苹果片与外部的的气体交换减弱，降低样品内的氧气，从而防止褐变反应发生。

综合产品总酚、DPPH 清除率及颜色各项指标，可以发现，从温度上来说，虽然高温有助于保护酚类物质，降低酶促褐变的发生，但在低温下，由于更有效的降低非酶褐变的发生，从而对于产品的色泽保持更为有利。而颜色作为市场消费的一个重要指标，应首先作为优先考虑指标，因此，苹果片宜在低温下进行干燥。从总酚和 DPPH 清除率这两个指标而言，即使在低温的条件下，涂膜-超声复合预处理也能够有效的增加干制品内酚类物质的含量并提高 DPPH 清除能力。因此，整体上来说，在 70 °C 条件下，涂膜-超声复合预处理对于苹果片干燥效率和产品品质的提高都是非常有效的。

2.5 复水比

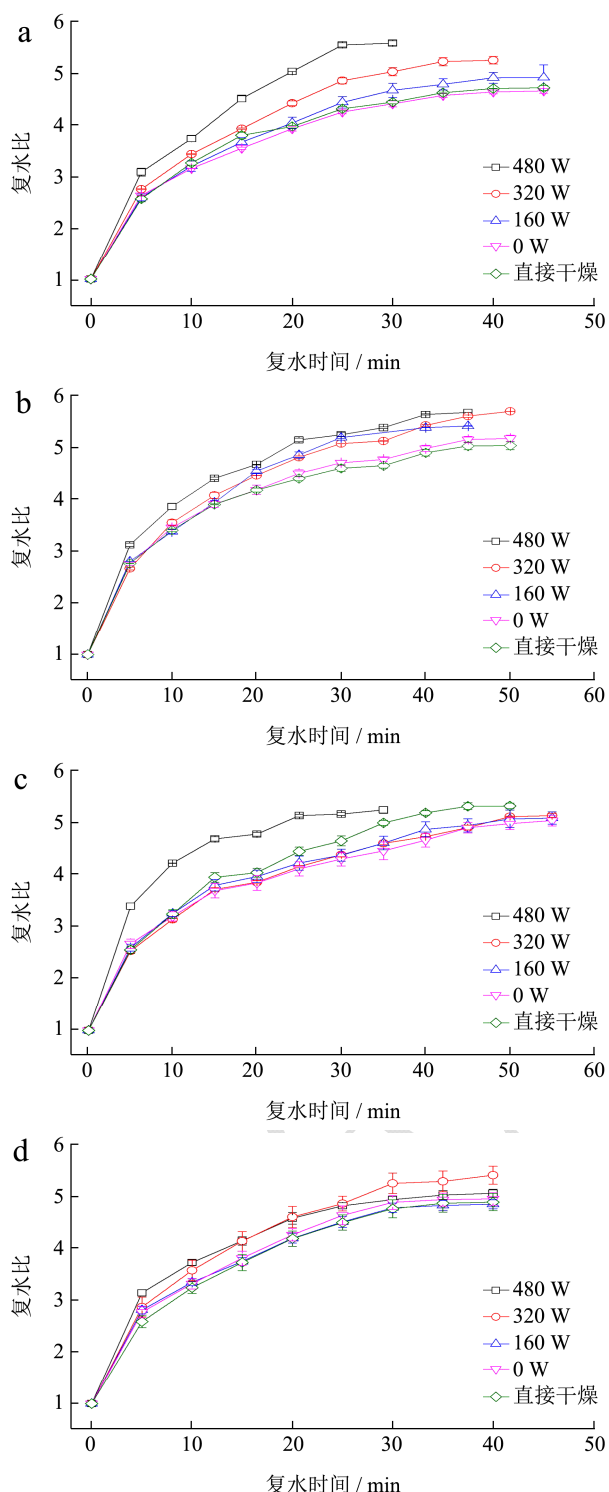


图5 苹果片复水时间-复水比变化

Fig.5 Apple slices rehydratotic time - change in the ratio of rehydratotic

注: a: 90 °C; b: 80 °C; c: 70 °C; d: 60 °C。

复水比是干燥后的干制品的复水能力的体现。由图5所示,在四种干燥温度下,不同的涂膜-超声预处理方式所得干制品的复水比变化曲线。可知在涂膜-

超声复合处理下的干制品中,超声功率越大,复水时间越快,在干燥温度为70 °C时,超声功率为480 W的样品复水时间为30 min,与直接干燥所需复水时间50 min相比缩短了40%。低温下干燥所得干制品的最终复水比较高温下的复水比大。60 °C时的复水比比90 °C时高。在涂膜-超声处理下的样品中,超声功率为480 W条件下,复水比最大,复水时间最快。

超声预处理使苹果片的内部产生的微孔通道增多,不仅在干燥过程中提高干燥速率,在复水过程中,水分也会快速通过微孔结构,渗透到组织内部,从而提高复水速率,增大复水比。60 °C下的样品比在90 °C下的复水效果好,但不是最佳。因为高温短时和低温长时都能使苹果片内细胞壁被破坏,导致水分进入细胞后,细胞的持水性降低,从而使复水比减小。

根据 Magorzata Nowa-cka^[29]的研究表明,经过超声预处理的苹果块样品相对未处理样品的孔隙率增大9%~14%,对苹果片干燥的水合性质有影响,这与夏蓉^[30]等人的结果也是相似的。在对香蕉进行超声前处理后,发现超声功率增大,香蕉片的复水比增大;马越^[31]等人在对脱水胡萝卜的干燥研究中也发现,热风干燥温度对脱水胡萝卜的复水性影响是随着温度的降低复水增加,但不是一直增加,会有一个最适温度。

2.6 微观结构

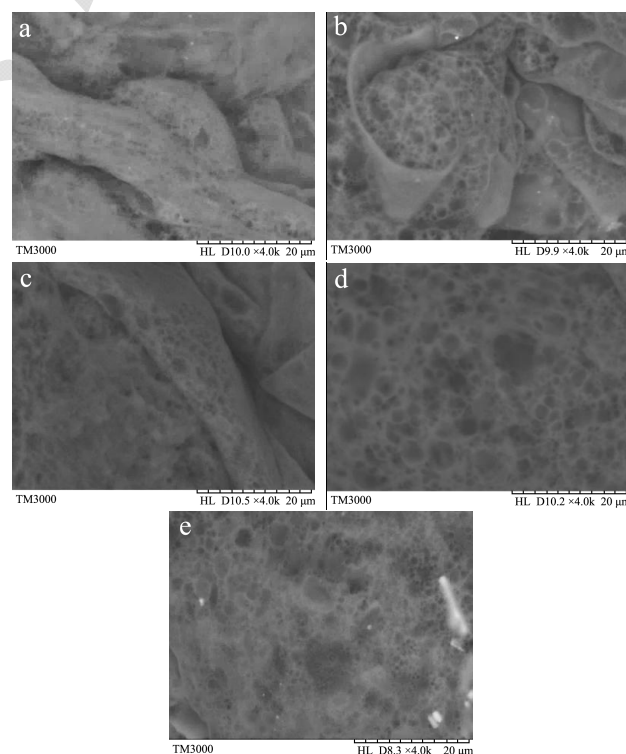


图6 80 °C下苹果片横截面扫描电镜图像

Fig.6 Cross-sectional SEM images of the apple slices at 80 °C

注: a: 480 W 涂膜; b: 320 W 涂膜; c: 160 W 涂膜; d:

0 W 涂膜; e: 直接干燥。

图6是在4000倍下观察的干制品的切断面的微观结构,在直接干燥和只涂膜后的干制品内部的微孔较小且是连续的。超声的样品内部有褶皱,而只涂膜和直接干燥的样品较平整。对比涂膜-超声复合处理但功率不同的干制品,在480 W下,微孔通道变大,随超声波逐渐增强,使空化泡逐渐变大,直至达到极限时破裂,产生瞬时压力,所以超声处理后的样品的干燥时间短以及复水比高。Fabiano F.A.N Fernandes^[32]和Fereshteh Nadery Dehsheikh^[33]表明了超声能产生微观通道的结果。苹果片内产生的微观通道和褶皱,有益于干燥过程中水分从内部向外部的扩散,也有益于复水过程中水分的渗入,从而提高复水比。

3 结论

本文研究了涂膜-超声复合预处理对苹果片热风干燥特性及产品品质的影响。结果表明,在热风干燥温度为70℃、CMC涂膜且超声功率为480 W时可获得较好的产品。在此条件下的样品相对于直接干燥的样品而言,干燥时间降低,总酚含量、DPPH清除率和复水比均增加,色差值降低。由此可表明,在苹果片进行热风干燥之前进行CMC涂膜-超声复合预处理既能强化物料干燥过程,又可以相应改善产品营养品质。因此,可将涂膜-超声复合处理应用于苹果片的热风干燥过程的前处理,并有望应用于其它农产品的干燥。

参考文献

- [1] 刘晓丽.浅析庆阳苹果的营养价值与保健作用[J].甘肃科技,2018,34(21):159-160
LIU Xiao-li. A brief analysis of the nutritional value and health care role of Qingyang apples [J]. Gansu Technology, 2018, 34(21): 159-160
- [2] H C P Karunasena, P Hesami, W Senadeera, et al. Scanning electron microscopic study of microstructure of gala apples during hot air drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 455-468
- [3] 曹崇文.微波真空干燥技术现状[J].干燥技术与设备,2004,3: 5-9
CAO Chong-wen. The current status of microwave vacuum drying technology [J]. Drying Technology and Equipment, 2004, 3: 5-9
- [4] 李建军.远红外干燥技术及应用前景研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2013,29(6):58-59
LI Jian-jun. Research on far infrared drying technology and application prospects [J]. Chifeng College Journal (Natural Science Edition), 2013, 29(6): 58-59
- [5] 张倩茹,尹蓉,王贤萍.热风干燥与真空冷冻干燥对果蔬酚类物质含量的影响[J].安徽农业科学,2017,45(16):106-108
ZHANG Qian-ru, YIN Rong, WANG Xian-ping. Effect of hot air drying and vacuum freeze-drying on the content of fruit and vegetable powder phenolic substances [J]. Anhui Agricultural Science, 2017, 45(16): 106-108
- [6] 孙宝芝,姜任秋,淮秀兰,等.超声空化强化渗透脱水[J].化工学报,2004,10:1714-1718
SUN Bao-zhi, JIANG Ren-qiu, HUAI Xiu-lan, et al. Ultrasonic cavitation enhances osmosis dehydration [J]. Journal of Chemical Engineering, 2004, 10: 1714-1718
- [7] 李泽珍,李蔚,狄建兵.热风干燥苹果片超声波预处理工艺的优化[J].山西农业大学学报(自然科学版),2017,37(9): 663-669
LI Ze-zhen, LI Wei, DI Jian-bing. Optimisation of ultrasonic pretreatment process for hot air-drying apple slices [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 37(9): 663-669
- [8] 巩鹏飞,赵庆生,赵兵.超声波应用于食品干燥的研究进展[J].食品研究与开发,2017,38(7):196-199
GONG Peng-fei, ZHAO Qing-sheng, ZHAO Bing. Advances in the study of ultrasound in food drying [J]. Food Research and Development, 2017, 38(7): 196-199
- [9] 段丹萍,鲁丽莎,王海宏,等.果蔬涂膜保鲜技术研究现状与应用前景[J].保鲜与加工,2009,9(6):1-6
DUAN Dan-ping, LU Li-sha, WNAG Hai-hong, et al. The current situation and application prospect of fruit and vegetable coating film preservation technology [J]. Fresh and Processed, 2009, 9(6): 1-6
- [10] 张海生,刘霞,张娇娇,等.复合涂膜保鲜剂对鲜切苹果保鲜品质的影响[J].保鲜与加工,2018,18(5):21-25
ZHANG Hai-sheng, LIU Xia, ZHANG Jiao-jiao, et al. The effect of composite film preservation agent on the preservation quality of fresh cut apples [J]. Preservation and Processing, 2018, 18(5): 21-25
- [11] 李健,刘雅南,刘宁,等.羧甲基纤维素的制备研究及应用现状[J].食品工业科技,2014,35(8):379-382
LI Jian, LIU Ya-nan, LIU Ning, et al. The preparation and application of methyl cellulose [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(8): 379-382
- [12] 国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.3-2016 食品安全国家标准食品中水分的测定[S]

- National Health and Family Planning Commission. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in food products of national standard situ for food safety[S]
- [13] ZHAO Dan-dan, AN Ke-jing, DING Sheng-hua, et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality [J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(8): 2308-2318
- [14] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2010, 34(6): 993-1008
- [15] 王琴,毛金梅,刘凤兰,等.黑杞一号鲜果和干果的酚类物质研究[J].食品与发酵工业,2019,45(16):104-108
- WANG Qin, MAO Jin-mei, LIU Feng-lan, et al. Study of phenolic substances of black and dried fruits [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(16): 104-108
- [16] 梅进,丁文平,熊金娟,等.Folin-Ciocalteu 比色法测定大麦糟中总酚条件的优化[J].食品与机械,2016,32(2):51-54
- MEI Jin, DING Wen-ping, XIONG Jin-juan, et al. Folin-ciocalteu color method to determine the optimization of the total phenolic conditions in barley waste [J]. Food and Machinery, 2016, 32(2): 51-54
- [17] LIU Xiao-li, ZHAO Mou-ming, WANG Jing-shui, et al. Antioxidant activity of methanolic extract of emblica fruit (*Phyllanthus emblica* L.) from six regions in China [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2008, 21(3): 219-228
- [18] WANG Yu-chuan, ZHANG Min, Arun S Mujumdar, et al. Effect of blanching on microwave freeze drying of stem lettuce cubes in a circular conduit drying chamber [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(2): 177-185
- [19] Corzo O, Bracho N, Pereira A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices [J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2023-2028
- [20] Fernandes Fabiano A N, Linhares Francisco E, Rodrigues Sueli. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(6): 1049-1054
- [21] 孙畅莹,刘云宏,曾雅,等.直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品与机械,2018,34(9):37-42
- SUN Chang-ying, LIU Yun-hong, ZENG Ya, et al. Direct-touch ultrasonic enhances the drying properties of hot air dry pear slices [J]. Food and Machinery, 2018, 34(9): 37-42
- [22] 赵芳,陈振乾,施明恒.苹果片超声波预干燥传质过程试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):124-128
- ZHAO Fang, CHEN Zhen-qian, SHI Ming-heng. Apple tablet ultrasonic pre-drying transfer process experimental study [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2011, 41(1): 124-128
- [23] Óscar Rodríguez, Juan V Santacatalina, Susana Simal, et al. Influence of powerful trasound application on drying kinetic-s of apple and its antioxidant and microstructural properties [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 129: 21-29
- [24] 朱翠平.不同干燥联合预处理方式对牛蒡脆片品质及抗氧化能力的影响[D].南京:南京农业大学,2016
- ZHU Cui-ping. The effect of different drying combined pretreatment methods on the quality and antioxidant capacity of oxen crisps [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016
- [25] 刘冬.新疆红肉苹果对流式热风干燥动力学及品质控制研究[D].西安:陕西师范大学,2017
- LIU Dong. Xinjiang red meat apple convection hot air drying dynamics and quality control research [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017
- [26] 苟小菊,刘冬,杨曦,等.热风干燥温度对新疆红肉苹果粉品质的影响[J].食品科学,2018,39(21):87-93
- GOU Xiao-ju, LIU Dong, YANG Xi, et al. The effect of hot air drying temperature on the quality of red meat apple powder in Xinjiang [J]. Food Science, 2018, 39(21): 87-93
- [27] Somayeh Taghian Dinani, Nasser Hamdami, Mohammad Shahedi, et al. Optimization of carboxymethyl cellulose and calcium chloride dip-coating on mushroom slices prior to hot air drying using response surface methodology [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(3): 1269-1278
- [28] C Tien, C Vachon, M A Mateescu, et al. Milk protein coatings prevent oxidative browning of apples and potatoes [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(4): 512-516
- [29] Magorzata Nowa-cka, Artur Wiktor, Magdalena Śledź, et al. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 3: 427-433
- [30] 夏蓉,姬青华,周存山,等.超声预处理和湿度控制对香蕉干燥特性的影响[J].包装工程,2019,40(1):40-48
- XIA Rong, JI Qing-hua, ZHOU Cun-shan, et al. Ultrasound pretreatment and humidity control on the effects of banana drying properties[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 40-48

(下转第 132 页)