

# 微波干燥条件对杏脯干燥特性与品质的影响

## Effects of different microwave drying conditions on drying characteristics and quality of preserved apricots

赵红霞<sup>1</sup> 王应强<sup>1,2</sup> 马玉荷<sup>1</sup>

ZHAO Hong-xia<sup>1</sup> WANG Ying-qiang<sup>1,2</sup> MA Yu-he<sup>1</sup>

刘烨榕<sup>1</sup> 温建华<sup>3</sup> 张变飞<sup>1</sup>

LIU Ye-rong<sup>1</sup> WEN Jian-hua<sup>3</sup> ZHANG Bian-fei<sup>1</sup>

(1. 陇东学院农林科技学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 甘肃省陇东生物资源保护利用与生态修复重点实验室, 甘肃 庆阳 745000; 3. 南京澳润微波科技有限公司, 江苏 南京 210041)

(1. College of Agriculture and Forestry, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China; 2. Gansu Key Laboratory of Protection and Utilization for Biological Resources and Ecological Restoration, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China; 3. Nanjing Orient Microwave Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210041, China)

**摘要:**目的:提高杏脯的干燥效率及产品品质。方法:分别用转盘式微波炉(RMD)和微波对流耦合干燥机(MCD)干燥杏脯,考察微波功率、微波发射方式、切分程度及物料是否转动对杏脯干燥特性、焦化率、色值、感官品质及复水特性的影响,并与传统热风干燥(HD)进行比较。结果:与HD的1040 min(16块)和840 min(48块)相比,微波干燥显著缩短干燥时间,不同微波干燥条件下所需的干燥时间为40~400 min;脉冲比越大或功率越高或物料尺寸越大,干燥所用时间越短,在MCD中控温微波干燥耗时最长。无论是在RMD还是不控温MCD中静态干燥,杏脯均出现严重的烧焦现象,焦化率为17%~100%,物料转动时焦化率高于静态干燥的,而在MCD中控温静态干燥避免了物料的烧焦现象,且MCD中控温静态干燥的杏脯色值和感官评价最接近HD的,复水比与HD仅相差3.45%~5.17%,获得最高的感官评价分(87.2分)。结论:MCD中控温静态干燥可以作为杏脯的高效干燥方法。

**关键词:**杏脯;微波干燥;控温;干燥特性;品质

**Abstract:** Objective: This study aimed to improve the drying efficiency and product quality of preserved apricot. Methods: The

preserved apricots were dried using the rotary microwave oven (RMD) and the microwave coupled with convection dryer (MCD). The effect of microwave power, microwave emission mode, cutting and material movement on drying characteristics, the scorching rate, color and sensory quality were investigated and compared with traditional hot air drying (HD). Results: Compared with 1040 min (16 pieces) and 840 min (48 pieces) of HD, the drying time was significantly shortened by microwave drying, ranging from 40 to 400 min. The drying time could be shorten by large pulse ratio, high power or large material size, and the longest drying time was in MCD temperature controlled microwave. Both RMD and MCD static drying caused serious charring phenomenon in apricots, with the char rate ranging from 17% to 100%, which was higher than that in static drying. However, the char phenomenon was avoided in MCD static drying, and the color value and sensory evaluation of apricots in MCD static drying were closest to HD. The rehydration ratio was only 3.45%~5.17% different from HD, and the highest sensory evaluation score (87.2 points) was obtained. Conclusion: MCD temperature-controlled static drying can be used as an efficient method for apricots.

**Keywords:** preserved apricots; microwave drying; temperature control; drying characteristics; quality

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:32060544);庆阳市科技支撑项目(编号:QNKB2-11);庆阳市自然科学基金项目(编号:QY2921A-F018)

**作者简介:**赵红霞(1987—),女,陇东学院副教授,硕士。

E-mail: 519481891@qq.com

**收稿日期:**2022-10-04 **改回日期:**2023-03-13

杏子风味独特,富含多种植物化学成分。但杏产季集中,水分含量高不耐贮藏,且不能很好地保存营养<sup>[1]</sup>,因此开发杏深加工产品显得尤为重要,中国已经建立起

杏浆和杏饮料的生产线,但生产能力十分有限,40%~50%的鲜杏还需要在产地加工成杏干制品,提高附加值<sup>[2]</sup>。杏脯是杏子深加工重要的产品之一,加工过程包括切分、去核、熏硫(或浸硫)护色、多次高温糖煮浸糖、干燥等步骤,其中干燥环节是影响杏脯品质和加工效率的关键环节。杏脯干燥目前仍以热风干燥为主,在温度为50~70℃,相对湿度平均在80%左右的高温高湿条件下延续10h以上,有的甚至长达30h以上<sup>[3]</sup>,因此受温度影响产生的非酶促褐变反应是影响杏脯感官品质的主要因素<sup>[3-4]</sup>。

微波技术是以微波对介电材料(如水分、脂肪、蛋白质等)迅速立体地加热为基础发展起来的一种食品物料强力脱水技术<sup>[5-7]</sup>,是利用微波交变电场的作用,诱导物料内部的极性分子发生离子传导和偶极子转动,分子间因发生剧烈的摩擦和碰撞而产生大量热能,导致物料内部水分吸收热能后迅速汽化,从而在物料内部和外部形成内高外低的压力差,在内外压力差作用下迫使内部水分向表面迁移,进而完成干燥,其具有速度快、效率高、加热温度和功率均可调节、自动化程度高等优点<sup>[8-10]</sup>。但是微波相关干燥也存在一定缺陷,比如内外干燥不均匀,局部温度过高易烧焦,水分急剧汽化形成蒸汽流对物料内部结构产生剧烈冲击导致产品质地变差等缺点<sup>[11-12]</sup>。不当的微波干燥条件是导致干燥产品质量劣变的主要原因,微波功率大小、功率输出模式以及控温与否、物料状态及其他干燥技术的组合等因素影响干燥时间、能耗与产品质量<sup>[13-15]</sup>。目前,有关果蔬在不同微波干燥设备、不同工艺条件下比较研究的报道较少。

研究拟以预处理的杏肉为原料,分别用转盘式微波炉(RMD)和微波对流耦合干燥机(MCD)干燥杏脯,考察微波功率、微波发射方式、切分程度及物料是否转动对杏脯干燥特性、焦化率、色值、感官品质及复水特性的影响,并与传统热风干燥(HD)进行比较,以期为开发高品质杏脯提供更加高效的干燥方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

新鲜曹杏:选用成熟度一致,大小、色泽相近,无机械损伤和病虫害的新鲜杏,采收后冷藏,市售;

白砂糖:市售。

#### 1.1.2 主要仪器设备

糖度计:SW-LB90T型,西安测维光电有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9420A型,上海一恒科学仪器有限责任公司;

微波炉:MI-211A型,美的厨房电器制造有限公司;

电子天平:EX2202ZH型,奥豪斯仪器(常州)有限公司;

电热鼓风干燥箱:101型,北京科伟永兴仪器有限公司;

微波对流耦合干燥设备:ORW1.OS-3000R型,南京澳润微波科技有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 杏肉预处理 选用质地柔软、色泽橙黄、肉厚核小、成熟度八成左右的杏果,冲洗干净,利用小刀沿脐缝线切成大小几乎相同的两瓣,并去除杏核后于0.2%~0.3%焦亚硫酸氢钠溶液中浸泡20~30min,用水冲漂洗干净。用40%糖液煮沸持续10min左右,倒入烧杯内糖渍12~24h后,再用50%糖液煮沸2~3min,浸渍12~24h。捞出晾晒,使杏碗凹面向上,让水分自然蒸发。当杏碗失重1/3左右时,用65%糖液煮15~20min,当糖液糖度达到70%以上时,捞出杏碗沥去糖液,备用<sup>[16]</sup>。每次干燥选用处理好的杏肉8块,切分成大小几乎相同的16块或48块,总重量为(116.07±2.52)g。

#### 1.2.3 干燥试验

(1) HD:将切好果坯均匀摆放在烘盘中,放入热风干燥箱,温度50℃,每隔30min记录一次质量与烧焦片数,水分含量降至20%左右时取出物料,停止干燥。

(2) RMD干燥:微波炉内腔尺寸为295mm×315mm×218mm,微波功率为700W,以脉冲方式发射,微波脉冲比为14:8和18:4。果坯均匀摆放在烘盘中,随转盘转动。每隔10min记录一次质量与烧焦片数,水分含量降至20%左右时取出物料,停止干燥。

(3) 不控温MCD干燥:选用课题组开发的MCD干燥杏脯,该设备主体由热风系统和微波系统两部分组成,可分别实现微波、对流以及微波对流耦合干燥,其内腔尺寸为500mm×500mm×500mm,微波最大功率为2000W,可在恒功率(300~2000W)和恒温模式下进行。不控温微波干燥在300,400W下进行,每隔20min记录一次质量与烧焦片数,水分含量降至20%左右时取出物料,停止干燥。

(4) 控温MCD干燥:微波初始功率为300W,通过红外热像仪控制物料盘最高点温度实现控温,当物料最高点温度达到设定温度时微波停止输出。前360min设置温度为80℃,之后升高控制温度为100℃,每隔20min自动记录一次物料重量,水分含量降至20%左右取出物料,停止干燥。

#### 1.2.4 指标测定

(1) 水分含量:按GB5009.3—2016执行。

(2) 焦化率:按式(1)计算。

$$S = \frac{n_s}{n} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S——杏脯焦化程度, %;

$n_s$ ——杏脯焦化数, 块;

$n$ ——杏脯总数, 块。

(3) 色值: 采用色差计测定杏脯样品的表面色泽 ( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ), 重复测量 5 次。并分别按式(2)、式(3)计算色彩角( $h$ )和彩度( $C^*$ )。

$$h^\circ = \arctg(b^*/a^*) (a^* > 0, b^* > 0), \quad (2)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

$h$ ——色调,  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  分别代表酱红色调、黄色调、蓝绿色调和蓝色调。

(4) 感官评价: 参照 GH/T 1156—2021 并适当改进。由 10 名食品科学与工程专业学生按表 1 进行综合评分, 结果取平均值。

(5) 杏脯复水性: 参照孙丽婷等<sup>[17]</sup>的方法。

表 1 杏脯感官品质评定标准

Table 1 Sensory quality assessment criteria for preserved apricot

项目	评分标准	分值
色泽	金黄色、色泽鲜亮、明度好	30~40
	黄褐色、色泽稍亮、明度一般	11~29
	褐色、色泽发暗、明度差	0~10
组织形态	组织形态饱满、不粘手、无破裂	20~30
	稍有干缩、无流糖现象	11~19
	有干缩、流糖现象	0~10
口感滋味	酸甜适中、杏果特有风味浓厚、软硬适中	20~30
	酸/甜味稍浓或稍淡、无异味、软硬适中	11~19
	甜/酸味过浓或过淡、有轻微异味、过软或过硬	0~10

### 1.3 数据处理

(1) 干燥曲线的计算: 自动记录一定时间间隔物料质量, 某一时刻的水分含量按式(4)计算。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \quad (4)$$

式中:

$M_t$ ——杏脯在干燥任意  $t$  时刻的干基含水量 kg/kg;

$m_t, m_d$ ——干燥任意  $t$  时刻和绝干物料的质量, kg。

干燥速率为单位时间内水分含量的变化量, 按式(5)计算。

$$D_r = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (5)$$

式中:

$D_r$ ——干燥速率, kg/(kg 干基 · min);

$M_t, M_{t+\Delta t}$ ——干燥物料在  $t$  和  $t + \Delta t$  时刻的水分含量, kg/kg 干基;

$\Delta t$ ——取样间隔时间, min。

(2) 统计学分析: 采用 SPSS 15.0.1 进行均值间显著性分析, 结果表示为  $\bar{x} \pm SD$ , 用 Excel 2007 软件进行误差计算及制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波干燥条件对杏脯干燥曲线的影响

由图 1 可知, 在 HD 下, 当切分为 16 块时所需时间为 1 040 min, 而切分为 48 块时需要 840 min, 表明物料切分越小, 干燥所用时间越短。微波脉冲和切分程度显著影响杏脯的干燥, 当脉冲比为 14 : 8 时, 干燥仅用时 40 min, 当脉冲比为 18 : 4 时, 切分为 16 块样品干燥时间为 90 min, 48 块样品为 110 min, 与 HD 相比, RMD 干燥明显缩短了干燥时间。果肉的切分程度也显著影响干燥时间 ( $P < 0.05$ ), 当切分为 16 块时, 在脉冲比为 18 : 4, 14 : 8 条件下, 与切分 48 块相比, 干燥时间均较短, 表明在 RMD 干燥下, 物料切分越大, 干燥时间越短, 与 HD 的相反, 可能是因为微波加热是立体加热而不是表面加热, 微波能量直接耗散于被干燥物料的湿区, 产生相对大的温度梯度, 且其温度梯度与湿度梯度方向一致, 加大了物料内部传热传质的推动力, 加速了物料干燥速率, 从而达到快速干燥的目的<sup>[14]</sup>。杏脯的切分程度显著影响 MCD 干燥时间 ( $P < 0.05$ ), 当切分为 16 块时, 在功率 300, 400 W 条件下所用的干燥时间仅为 160, 140 min, 而切分为 48 块时, 所用时间分别为 260, 240 min, 干燥时间分别缩短了 38.46% 和 41.67%, 表明切分越大, 干燥所用时间越短。在切分相同的情况下, 功率越大, 干燥越快, 所需干燥时间越短。与 HD 相比, MCD 干燥达到平衡明显更快 (HD 约 20 h, MCD 干燥只需约 4 h), 是由于微波能以电磁辐射形式进入湿样品中, 样品受热由内到外产生水蒸气形成气压差, 进而驱动样品中水蒸气向表面迁移。极性分子的摩擦运动和生热效应, 使热量由内而外进行释放。样品的传热、温度梯度和蒸汽迁移方向一致, 同时对流加快样品表面水分的蒸发, 所以大大提高了干燥速率<sup>[9, 12]</sup>, 与吴满刚等<sup>[18]</sup>的结论一致。在控温 MCD 干燥下, 当切分为 16 块, 80 °C 干燥 160~200 min 时, 杏脯的质量保持恒重, 此时控制温度为 100 °C, 继续干燥直至杏脯水分含量达到 20% 左右, 共需 340 min, 而当切分为 48 块, 80 °C 干燥 220~260 min 时, 杏脯的质量保持恒重, 此时控制温度为 100 °C, 继续干燥直至杏脯水分含量达到 20% 左右, 共需 400 min, 表明采用分段控温式 MCD 干燥可以快速干燥杏脯。

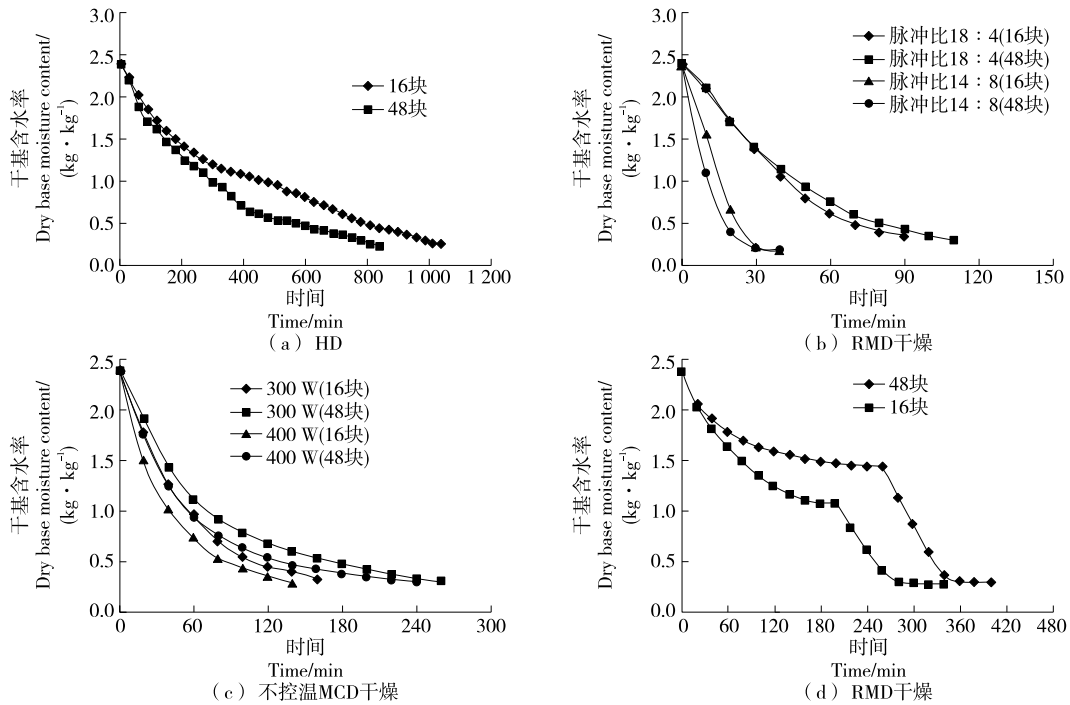


图 1 微波干燥条件对杏脯干燥曲线的影响

Figure 1 Effects of different microwave drying conditions on drying curve of the preserved apricots

由图 2 可知,脉冲比为 14 : 8 下杏脯的干燥速率最大,其次为脉冲比为 18 : 4,HD 的速率最小,且当切分为 16 块时,其干燥速率明显高于切分为 48 块时的 ( $P < 0.05$ )。物料在干燥初期,水分蒸发速度较快,干燥速度快;在降速干燥期至临界水分时,干燥速度降低。这是因为干燥初期样品中的水分升温到转化为水蒸气需要一个过程,在干燥后期,物料的水分含量持续下降,干燥速度也随之下降。微波脉冲比为 14 : 8 下的干燥速率曲线较为陡峭,降速点很明显。MCD 干燥下,300 W(16,48 块)和 400 W(16,48 块)的干燥速率曲线整体呈先增速后降速的趋势,未经历恒速干燥阶段,说明杏脯在干燥过程中,内部水分扩散是决定因素,决定了原料的干燥特性。

400 W(16 块)的干燥速率明显大于其他 3 种干燥方法,主要是因为 MCD 结合了微波和对流快速加热的优点。控温 MCD 干燥下,干燥速率曲线整体呈先增速后降速的趋势,干燥速率曲线呈“M”型波动。这主要是因为 80 °C 时出现恒重,此时速率降为 0,当温度升高至 100 °C 时,出现增速阶段,后期速率逐渐降低。干燥温度越高,平均干燥速率也相应增大。

### 2.2 微波干燥条件对杏脯焦化率的影响

由图 3 可知,在脉冲式和恒功率条件下干燥时,随着干燥的进行杏脯焦化率逐渐增加,且切块越大焦化率越高,但恒温模式干燥有效控制了微波功率的输出,减少了焦化。在 HD 下,杏脯均无烧焦现象,而在 RMD 干燥时

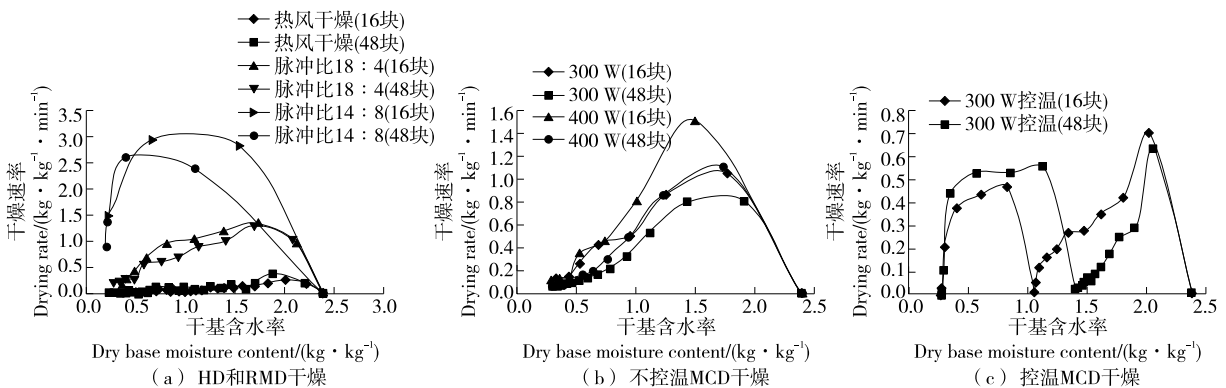


图 2 微波干燥条件对杏脯干燥速率曲线的影响

Figure 2 Effects of different microwave drying conditions on drying rate curve of the preserved apricots

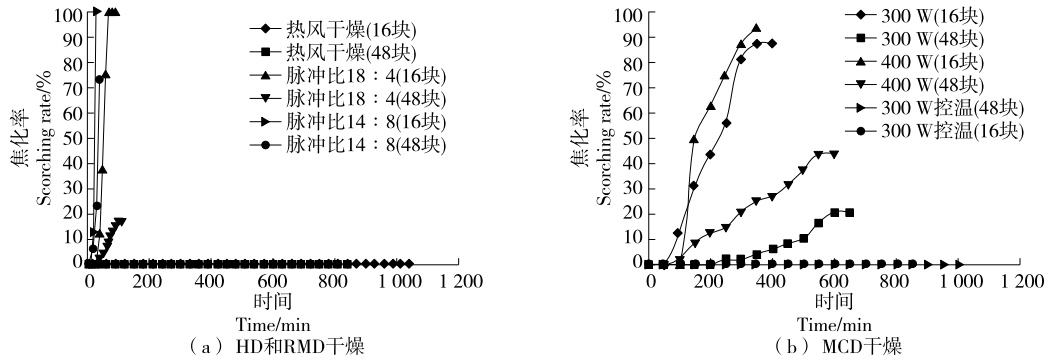


图3 微波干燥条件对杏脯焦化率的影响

Figure 3 Effects of different microwave drying conditions on the scorching rate of the preserved apricots

均出现物料烧焦现象,在脉冲比为18:4(16块)时,物料焦化率为100%;而48块物料的焦化率为17%;在脉冲比为18:4(16块)时,焦化率为100%,48块物料的焦化率为73%。这主要是因为食品原料在微波加热中,一方面随着干燥的进行,被干燥物料的水分含量和温度均发生变化,随着水分含量减少以及水分活度的降低,介电特性减弱,物料微波吸收能力减弱,但微波穿透深度增加,物料内部加热加剧,尤其在尺寸较大的物料干燥时表现得最为突出;另一方面,物料含糖量增加会导致物料微波吸收能力增强,微波加热效果增强,过高的功率密度及穿透深度而极易发生热失控,导致物料被过度加热而烧焦,尤其在恒功率与大尺寸物料干燥时。控温MCD干燥的样品未全部烧焦,烧焦率为21%~94%,且48块的烧焦率较高。在控温条件下,16,48块样品均无烧焦现象,表明控温MCD干燥可以明显减少杏脯的焦化。这与Botha等<sup>[19-20]</sup>的结论类似。

### 2.3 微波条件对杏脯色泽的影响

由表2可知,与HD相比,控温MCD干燥300W(16块)下产品的 $L^*$ 最高,说明杏脯的光泽度最好。RMD干燥下产品的 $L^*$ 较小,且 $a^*$ 和 $b^*$ 均偏低,可能是因为该样品均有烧焦,且杏子颜色偏绿色。HD(48块)下 $C^*$ 最大,表面干燥产品的饱和度(彩度)较好,其次为控温MCD干燥,而RMD干燥产品的 $C^*$ 最小,饱和度最差。HD和控温MCD干燥下,产品的色彩角偏向 $97.03^\circ\sim 85.54^\circ$ ,表明该条件下样品颜色在黄色和酱红色之间,两者的最接近。MCD和RMD干燥产品的色彩角在 $35.20^\circ\sim 60.96^\circ$ ,说明该干燥条件下样品颜色明显偏向酱红色,主要是由于微波干燥的不均匀性造成局部过热,一部分还原糖和氨基酸发生了美拉德反应,导致有少量的黑色素<sup>[21-22]</sup>。

### 2.4 微波干燥条件对杏脯感官质量的影响

由表3可知,从色泽上来说,以控温MCD干燥300W

表2 微波干燥条件对杏脯色泽参数的影响<sup>†</sup>

Table 2 Effects of different microwave drying conditions on the color parameters of the preserved apricots

干燥方法	干燥参数	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h/(^\circ)$
HD	16块	$32.94\pm 0.02^b$	$43.54\pm 0.12^c$	$73.30\pm 0.32^b$	$85.26\pm 1.12^b$	$96.44\pm 0.94^a$
	48块	$35.86\pm 0.32^a$	$48.29\pm 0.41^a$	$78.30\pm 0.02^a$	$91.99\pm 0.92^a$	$92.91\pm 0.84^b$
RMD干燥	脉冲比14:8(16块)	$5.65\pm 0.81^g$	$23.11\pm 0.77^g$	$13.45\pm 0.82^g$	$26.74\pm 0.50^i$	$33.33\pm 0.52^j$
	脉冲比14:8(48块)	$4.64\pm 0.64^g$	$26.28\pm 0.02^f$	$17.61\pm 0.62^f$	$31.63\pm 0.51^g$	$38.39\pm 0.02^g$
	脉冲比18:4(16块)	$8.91\pm 0.12^f$	$23.11\pm 0.72^g$	$14.20\pm 0.32^g$	$27.13\pm 0.49^{hi}$	$35.20\pm 0.92^h$
	脉冲比18:4(48块)	$8.12\pm 0.92^f$	$19.02\pm 0.42^j$	$21.17\pm 0.78^e$	$28.46\pm 0.40^h$	$63.77\pm 1.02^e$
MCD干燥	300W(16块)	$15.20\pm 0.52^d$	$22.97\pm 0.67^h$	$24.44\pm 0.52^e$	$33.54\pm 0.50^f$	$60.96\pm 0.92^f$
	300W(48块)	$35.20\pm 0.82^a$	$31.33\pm 0.89^e$	$36.67\pm 0.71^d$	$48.23\pm 0.02^e$	$67.07\pm 1.07^d$
	400W(16块)	$12.98\pm 0.09^e$	$20.89\pm 0.42^j$	$23.31\pm 0.34^e$	$31.30\pm 0.66^g$	$63.92\pm 1.05^e$
	400W(48块)	$13.89\pm 0.12^e$	$31.37\pm 0.02^e$	$36.67\pm 0.62^d$	$48.26\pm 0.09^e$	$66.98\pm 0.82^d$
	300W控温(48块)	$30.99\pm 0.50^c$	$46.67\pm 0.42^b$	$69.68\pm 0.73^c$	$83.87\pm 0.52^c$	$85.54\pm 0.69^c$
	300W控温(16块)	$33.44\pm 0.62^b$	$40.72\pm 0.78^d$	$68.96\pm 0.54^c$	$80.08\pm 0.64^d$	$97.03\pm 0.71^a$

† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

表 3 微波干燥条件对杏脯感官质量的影响<sup>†</sup>

Table 3 Effects of different microwave drying conditions on the sensory quality of the preserved apricots

干燥条件	干燥参数	色泽	组织形态	口感滋味	总分
HD	16 块	35.60±0.22 <sup>c</sup>	24.00±1.12 <sup>b</sup>	20.60±1.09 <sup>b</sup>	80.20±2.43 <sup>c</sup>
	48 块	36.00±0.09 <sup>b</sup>	23.70±0.23 <sup>b</sup>	20.60±1.12 <sup>b</sup>	80.30±1.44 <sup>c</sup>
RMD 干燥	脉冲比 14 : 8(16 块)	3.40±1.07 <sup>k</sup>	5.00±1.06 <sup>i</sup>	0	8.40±2.13 <sup>j</sup>
	脉冲比 14 : 8(48 块)	7.90±1.04 <sup>i</sup>	8.40±0.26 <sup>h</sup>	2.50±0.12 <sup>f</sup>	18.80±1.42 <sup>h</sup>
	脉冲比 18 : 4(16 块)	4.90±0.22 <sup>j</sup>	5.40±1.12 <sup>i</sup>	0	10.30±1.34 <sup>i</sup>
	脉冲比 18 : 4(48 块)	17.40±1.0 <sup>e</sup>	12.10±1.32 <sup>e</sup>	1.20±1.42 <sup>g</sup>	30.70±3.87 <sup>f</sup>
MCD 干燥	300W(16 块)	9.20±0.12 <sup>h</sup>	10.70±1.24 <sup>f</sup>	7.50±0.12 <sup>d</sup>	27.40±1.48 <sup>h</sup>
	300 W(48 块)	20.40±1.02 <sup>f</sup>	26.60±1.12 <sup>a</sup>	4.50±0.08 <sup>e</sup>	51.50±3.22 <sup>e</sup>
	400 W(16 块)	8.80±0.12 <sup>h</sup>	9.40±1.32 <sup>j</sup>	6.60±0.92 <sup>d</sup>	24.80±2.36 <sup>g</sup>
	400 W(48 块)	27.70±0.32 <sup>e</sup>	19.80±2.24 <sup>d</sup>	18.30±0.52 <sup>c</sup>	65.80±3.08 <sup>d</sup>
	300 W 控温(48 块)	30.70±0.02 <sup>d</sup>	26.80±0.92 <sup>a</sup>	25.00±1.22 <sup>a</sup>	82.50±1.86 <sup>b</sup>
	300 W 控温(16 块)	38.70±1.12 <sup>a</sup>	22.40±1.04 <sup>c</sup>	26.10±0.32 <sup>a</sup>	87.20±2.48 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同列字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。

(16 块)和 HD(48 块)的产品为最佳,颜色为金黄色或者深黄色。从组织形态上来说,HD 和控温 MCD 干燥 300 W 的产品组织形态饱满、不粘手、无破裂为最佳,RMD 脉冲比为 18 : 4 的产品干缩严重、表面粘黏。从口感滋味上来说,HD 和控温 MCD 干燥的产品酸甜适中、杏果特有风味浓厚、软硬适中。不控温 MCD 产品因有烧焦,口感滋味较差。控温 MCD 干燥 300 W(16 块)下的产品色泽明亮,杏肉完整、饱满、组织状态好,获得最高分 87.20±2.48。

2.5 微波干燥条件对杏脯复水特性的影响

由图 4 可知,随着复水时间的延长,不同微波干燥条件制备的杏脯复水比均逐渐上升,前 30 min 上升速度最快,以 HD 为对照,控温 MCD 干燥的杏脯复水率均显著

高于其他干燥条件下的( $P < 0.05$ ),且切分块数越小的杏脯复水率均高于同条件下切分块数大的。不控温 MCD 干燥下,杏脯的复水率比控温下的低 10.71%~14.29%;RMD 干燥的杏脯复水率比控温 MCD 干燥下的低 21.43%~28.57%。HD 下的杏脯复水率和控温 MCD 下的相差较小,只增加了 3.45%~5.17%。控温 MCD 干燥的杏脯具有较高的复水性,可能是因为微波对流耦合干燥破坏了杏脯的细胞壁导致其结构致密性较差。

3 结论

考察了不同微波干燥条件对杏脯干燥动力学、焦化率、色泽及感官品质的影响。结果表明,微波干燥对干燥时间和干燥速率以及相关品质有显著性影响。与传统热风干燥的 1 040 min(16 块)和 840 min(48 块)相比,微波干燥能够显著缩短干燥时间,此条件下所需的干燥时间为 40~400 min;微波干燥条件对干燥时间有显著性影响,脉冲比越大或功率越高或物料尺寸越大,干燥所用时间越短,在微波对流耦合干燥机中控温微波干燥耗时最长。在转盘式微波炉和不控温微波对流耦合干燥机中静态干燥,杏脯均出现严重的烧焦现象,焦化率为 17%~100%,且物料转动时的焦化率高于静态干燥的,而在微波对流耦合干燥机中控温静态干燥避免了物料的烧焦现象,且其杏脯色值和感官评价最接近传统热风干燥的,复水性与传统热风干燥的相比,仅相差 3.45%~5.17%,获得最高评价分 87.2 分。综上,脉冲式和恒功率模式很难用于杏脯的干燥,控温微波干燥方法在杏脯干燥中显示出巨大优势,有望取代传统的热风干燥用于杏脯的脱水工艺,但需进一步验证。后续可详细考察温度条件或者升温模式对杏脯干燥动力学和相关品质的影响。

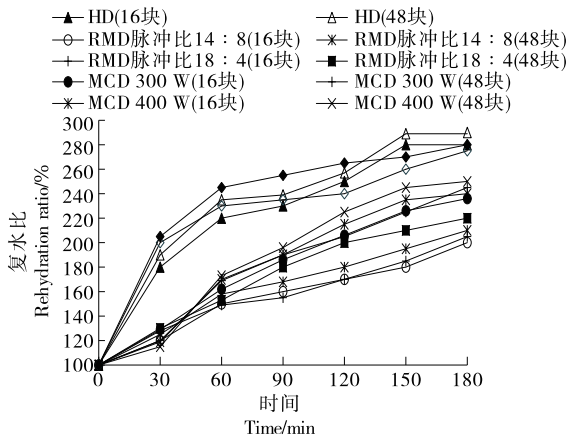


图 4 干燥条件对杏脯复水比的影响

Figure 4 Effects of different drying conditions on rehydration characteristics of the preserved apricots

## 参考文献

- [1] LIU B, FAN X, SHU C, et al. Comparison of non-contact blanching and traditional blanching pretreatment in improving the product quality, bioactive compounds, and antioxidant capacity of vacuum-dehydrated apricot[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(3): e13890.
- [2] 白峻文, 高振江, 刘宇婧, 等. 热蒸汽漂烫及真空脉动渗透加工杏脯试验研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(6): 80-85.
- BAI J W, GAO Z J, LIU Y J, et al. Experimental study on hot steam blanching and vacuum pulse infiltration processing of preserved apricot[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(6): 80-85.
- [3] 王玫, 陈璧州, 伍军, 等. 微波干燥桃脯、苹果脯的影响因素和节能效果的研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(3): 253-255.
- WANG M, CHEN B Z, WU J, et al. Study on the influencing factors and energy-saving effect of microwave drying of preserved peach and apple[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 1998, 14(3): 253-255.
- [4] 张汉禹, 王雪妃, 蒲志平, 等. 不同热风干制温度对赛买提杏干非酶褐变的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(7): 38-45.
- ZHANG H Y, WANG X F, PU Z X, et al. Effect of different hot air-drying temperature on non-enzymatic browning of Saimaiti apricot [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(7): 38-45.
- [5] HAO F, YUN Y, TANG J. Microwave drying of food and agricultural materials: Basics and heat and mass transfer modeling [J]. *Food Engineering Reviews*, 2012, 4(2): 89-106.
- [6] LU W Q, LI D, LU H, et al. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 86(4): 59-67.
- [7] KUMAR C, KARIM M A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 379-394.
- [8] KARIMI S, LAYEGHINIA N, ABBASI H. Microwave pretreatment followed by associated microwave-hot air drying of *Gundelia tournefortii* L.: Drying kinetics, energy consumption and quality characteristics[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021, 57(1): 133-146.
- [9] MAFFTOONAZAD N, DEGHANI M R, RAMASWAMY H S. Hybrid microwave-hot air tunnel drying of onion slices: Drying kinetics, energy efficiency, product rehydration, color, and flavor characteristics[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(5): 966-986.
- [10] SONG G, CHOUDHARY R, WATSON D G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2013, 6(1): 90-99.
- [11] XU W, CAO X, ZHU G. Effect of temperature difference on the aroma and quality of carrots processed through microwave drying combined with hot air drying[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2020, 120(3): 58-68.
- [12] 王庆玲, 栾艺, 王俊山, 等. 微波-热风耦合干燥处理对牛肉干品质的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*. (2022-06-16) [2023-03-13]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031684>.
- WANG Q L, LUAN Y, WANG J S, et al. Effect of combined microwave-hot air drying on the quality of beef jerky[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*. (2022-06-16) [2023-03-13]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031684>.
- [13] 张强, 邓酥萍, 张娜英, 等. 微波-热风联合干燥在芒果果脯加工中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(14): 104-109.
- ZHANG Q, DENG S P, ZHANG N Y, et al. Application of microwave-hot air combined with drying in processing preserved mango [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(14): 104-109.
- [14] 王童, 杨慧, 朱广成, 等. 热风、微波及其联合干燥对花生营养特性及感官品质的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(9): 2102-2110.
- WANG T, YANG H, ZHU G C, et al. Effects of hot air, microwave and combined drying on nutritional properties and sensory quality of peanut[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(9): 2102-2110.
- [15] 王宸之, 邓自高, 李琳, 等. 热风和微波干燥对龙眼品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(4): 429-436.
- WANG C Z, DENG Z G, LI L, et al. Changes in the quality of *dimocarpus longan* during the hot-air drying and microwave drying processes[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2018, 37(4): 429-436.
- [16] 叶兴乾. 果品蔬菜加工工艺学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 135-136.
- YE X Q. *Fruit and vegetable processing technology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 135-136.
- [17] 孙丽婷, 刘立增, 刘爱国, 等. 不同渗糖方式对红宝石李果脯品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(1): 180-185.
- SUN L J, LIU L Z, LIU A G, et al. Effects of different sugar infiltration methods on qualities of ruby plum preserved fruit[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(1): 180-185.
- [18] 吴满刚, 王俊山, 段立昆, 等. 不同干燥处理方法对鸡肉丁的干燥效果[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(7): 235-241.
- WU M G, WANG J S, DUAN L K, et al. Effects of different drying methods on drying chicken cubes [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(7): 235-241.
- [19] BOTHA G E, OLIVEIRA J C, AHRNÉ L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(2): 304-311.
- [20] RICARDO L M, ALINE I G, JADE V L, et al. Microwave vacuum drying of foods with temperature control by power modulation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65(10): 102473.
- [21] ANTONIO V G, MIRANDA M, RODRIGO C. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmotically treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(1): 16-23.
- [22] 李建硕. 微波加热过程热点与热均匀性控制与优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 5-10.
- LI J S. *Research on control and optimization of hot spot and thermal uniformity in microwave heating process*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 5-10.