

响应面法优化 香菇热风-微波联合干燥工艺

张慧¹, 张裕仁¹, 杨佳¹, 彭菁¹, 潘磊庆¹, 陈继昆², 屠康^{1,*}

(1.南京农业大学食品科学技术学院, 江苏南京 210095;

2.云南省农产品质量安全中心, 云南昆明 650225)

摘要:本文基于热风-微波分段联合干燥方式,探讨了联合干燥转换点干基含水率(2.00~5.00 g/g)、热风温度(50.0~70.0 ℃)及微波功率密度(6.67~33.33 W/g)对香菇营养成分、干燥特性及品质的影响。通过单因素实验确定较优参数范围并采用 Box-Behnken 组合设计优化联合干燥工艺,分析干燥工艺对干燥时间及香菇典型品质(色差、收缩率及多糖保留率)的影响。结果表明,通过响应面优化试验获得最优工艺为转换点干基含水率 4.20 g/g、热风温度 60.60 ℃、微波功率密度 30.00 W/g,此条件下的联合干燥时间为 178.33 min(其中热风干燥 170 min,微波干燥 8.33 min),产品色差 ΔE 为 11.21,收缩率为 65.28%,多糖保留率为 66.98%,综合评分为 0.145。研究结果表明热风-微波联合工艺能够实现香菇的快速干燥,并保证较好的干品品质。

关键词:热风-微波联合干燥工艺,香菇,干燥特性,品质,工艺优化

Optimization of Hot Air-microwave Combined Drying Process of Shiitakes by Response Surface Method

ZHANG Hui¹, ZHANG Yu-ren¹, YANG Jia¹, PENG Jing¹, PAN Lei-qing¹, CHEN Ji-kun², TU Kang^{1,*}

(1.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2.Yunnan Agricultural Product Quality and Safety Center, Kunming 650225, China)

Abstract: Hot air-microwave combined drying process was used to dry shiitakes in the current study. Effects of switching point (dry basis moisture contents 2.00~5.00 g/g), hot air temperature (50.0~70.0 ℃) and microwave power density (6.67~33.33 W/g) on the drying characteristics and quality of shiitakes were investigated. Single factor experiments combined with Box-Behnken design was used to optimize the process parameters of hot air-microwave drying process. Effects of dry process on total drying time, and quality of final products (color, shrinkage, polysaccharide retention) were analyzed. Results showed that the optimal parameters for this combined drying process for shiitakes were: Dry basis moisture content at switching point 4.20 g/g, hot air temperature 60.60 ℃ and microwave power density 30.00 W/g, and the corresponding drying time was 178.33 min (the hot air was dried for 170 min and the microwave was dried for 8.33 min), total color difference was 11.21, shrinkage was 65.28%, lentinan retention was 66.98%, and the overall score was 0.145. This study suggested that the hot air-microwave combination could be an effective drying method to obtain dehydrated shiitakes with high quality.

Key words: air-microwave combined drying process; shiitakes; drying characteristics; quality; processing optimization

中图分类号: TS255.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2019)14-0214-09

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.14.036

引文格式: 张慧, 张裕仁, 杨佳, 等. 响应面法优化香菇热风-微波联合干燥工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 214-221, 232.

香菇 (*Lentinus edodes*) 是世界第二大类食用菌, 富含多种氨基酸、矿物质等功能性成分^[1-4]。新鲜香菇由于含水量极高、新陈代谢旺盛而使得微生物快速繁殖从而快速腐烂^[5], 因此香菇采后需要选择合适的保藏方法来延长货架期。脱水干燥是香菇在贮藏

加工中重要的工序之一, 通过移除水分来抑制微生物生长以及子实体自身代谢活动^[6-7]。

香菇干燥研究中常用的方法有热风干燥、微波干燥、冷冻干燥、红外干燥等^[6]。每种单一干燥方法都有其优点及局限。例如热风干燥操作简单成本

收稿日期: 2018-11-26

作者简介: 张慧(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 2017108048@njau.edu.cn。

* 通讯作者: 屠康(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: kangtu@njau.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0400904-2)。

低,但速度慢,营养成分流失严重^[8];微波干燥耗时极短,但存在受热不均匀的问题^[9-11];冷冻干燥对产品品质破坏小但耗时长,成本高等^[12-13]。因此,为获得品质更佳的产品并节约成本,由两种或多种干燥方法组合的联合干燥技术应运而生^[14-15]。Apinyavisit等^[16]用微波热风联合对龙眼进行干燥,先采用微波干燥将其含水率降至70%,再通过热风干燥至终点,结果发现微波热风联合干燥的时间和能耗均小于热风干燥,且龙眼色泽更好。Jiang等^[17]采用冷冻干燥结合微波真空干燥秋葵,发现联合干燥获得的产品硬度与脆度比单一冷冻干燥的更佳,并且干燥时间和能耗分别减少75.36%和71.92%。近年来联合干燥研究较为广泛,成为果蔬脱水加工研究的热点之一。

现有研究针对热风-微波联合干燥香菇的干燥特性及优化工艺鲜见报道。本实验采用传统热风与微波快速干燥联合干燥香菇,旨在获得干燥耗时短且品质好的干香菇产品。利用单因素实验探究不同的转换点干基含水率、热风温度及微波功率密度对香菇干燥特性及产品品质的影响;结合响应面优化试验获得联合干燥最优工艺参数,为香菇干燥过程的进一步控制及干燥工艺的优选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜香菇 南京苏果超市;苯酚、浓硫酸、无水乙醇、茚三酮、抗坏血酸 均为分析纯,南京寿德生物科技有限公司。

DGG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;P70D20TP-C6 型格兰仕微波炉 广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;CR-13 型色差计 日本柯尼卡美能达公司;UV-1800 型紫外分光光度计 日本岛津公司;PY-G8 型功率计 绍兴上虞品益电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 挑选大小一致(伞盖直径约4.5~5.0 cm)、子实体完整的新鲜香菇,统一修剪菇柄至长度约为1.0 cm后清洗并擦干表面水分。将150 g香菇样品置于热风干燥箱中,调节热风温度将样品干燥至指定转换点后迅速移入微波炉中,在一定微波功率密度下继续干燥至终点(含水率<13%)。热风温度及时间是根据前两个单因素实验暂定,选择了单因素中较好的点进行微波功率密度实验。

1.2.2 单因素实验设计 以转换点干基含水率、热风温度及微波功率密度为单因素,考察其对香菇干燥时间及品质(色差、收缩率、能耗、复水比、香菇多糖、游离氨基酸及维生素C含量)的影响。不同转换点干基含水率干燥试验:先热风(温度为55℃)干燥,分别在干基含水率达到5.00、4.00、3.00及2.00 g/g时转换到微波(功率密度为20 W/g)干燥。不同热风温度干燥试验:热风温度分别为50、55、60、65、70℃,在干基含水率达到3.00 g/g时转换到微波(功率密度为20 W/g)干燥。不同微波功率密度干燥试验:先热风(温度为60℃)干燥,在干基含水率达到3.00 g/g时

转到微波(功率密度分别为6.67、13.33、20.00、26.67、33.33 W/g)干燥。

1.2.3 响应面试验设计 根据单因素实验结果,选择较优的转换点干基含水率、热风温度、微波功率密度范围进行Box-Behnken中心组合设计试验,以联合干燥时间、色差ΔE值、收缩率及多糖保留率按照一定权重组成的综合评分为响应值,评分时以各指标的最大值为参照将数据进行归一化,再给出不同的权重^[18](综合评分),因素水平设计见表1。

表1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment design

因素	水平		
	-1	0	1
X ₁ 转换点干基含水率(g/g)	2.50	3.50	4.50
X ₂ 热风温度(℃)	50.0	57.5	65.0
X ₃ 微波功率密度(W/g)	16.67	23.33	30.00

1.2.4 指标测定 初始干基含水率测定 依据GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》对香菇含水量进行测定,香菇的初始干基含水率测得为9.00 g/g。

1.2.4.1 干基含水率的计算

$$W_d = \frac{M_i - M_g}{M_g}$$

式中:W_d为物料干基含水率,g/g;M_g为绝干质量,g;M_i为物料实时质量,g。

1.2.4.2 干燥速率的计算 干燥速率用单位时间内干基含水率的变化量表示^[19]。

$$DR = \frac{W_1 - W_2}{T_2 - T_1}$$

式中:DR为干燥速率,g/(g·min);W₁和W₂分别为物料在T₁和T₂时刻的干基含水率,g/g。

1.2.4.3 色差测定 通过便携式色差计对香菇菌盖色泽进行重复测定,采用五点取样法记录香菇样品亮度(L*)、红绿色(a*)和黄蓝色(b*)后取平均值,计算色差ΔE^[20]。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}$$

式中:L₀^{*}、a₀^{*}、b₀^{*}分别表示新鲜香菇的色泽值,L*、a*、b*代表干燥香菇样品色泽值。

1.2.4.4 复水比测定 取4.0~5.0 g干香菇于烧杯中,加150 mL蒸馏水置于60℃恒温水浴锅中浸泡60 min,捞出后擦干称重^[6],计算复水比(R_R)。

$$R_R = \frac{M_{\text{复}}}{M_{\text{干}}}$$

式中:M_干和M_复分别表示复水前后样品的质量(g)。

1.2.4.5 收缩率测定 采用体积置换法测定计算,介质为小米^[13,21]。

$$SR = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100$$

式中:SR表示样品收缩率,%;V₀和V分别表示香菇干燥前后的体积,mL。

1.2.4.6 能耗测定 采用功率计测量。

1.2.4.7 香菇多糖含量测定及多糖保留率的计

算 参考 NY/T1676-2008《食用菌中粗多糖含量的测定》进行测定。称取 1.0 g 粉碎过 20 mm 孔径筛的样品,加 5 mL 水和 20 mL 无水乙醇混合后于 300 W 超声提取 30 min。提取结束后于 4000 r/min 离心 10 min,不溶物于沸水浴中提取 2 h 后过滤,将上清液转移至 100 mL 容量瓶并记为测定液。取 1 mL 测定液,加入 1 mL 苯酚溶液后立即加入 5 mL 浓硫酸静置 10 min,混合均匀于 30 ℃ 水浴 20 min,于 490 nm 下测定吸光度。以标准葡萄糖质量浓度为横坐标,吸光度 A_{490} 为纵坐标,绘制葡萄糖标准曲线,得到标准曲线方程为 $y = 10.058x - 0.0001 (R^2 = 0.9986)$ 。样品中多糖含量以克每百克(g/100 g)表示,多糖保留率为干燥样品中多糖含量与新鲜香菇中多糖含量的比值。按下式进行计算。

多糖含量(g/100 g) = [查得的含糖量(μg) × 样品定容体积(mL)] × 校正系数 0.9×10^{-4} / [样品质量(g) × 测定液体积(mL)]

多糖保留率(%) = [干燥样品中香菇多糖含量(g/100 g)] × 100 / [新鲜香菇中香菇多糖含量(g/100 g)]

1.2.4.8 游离氨基酸总量测定 采用茚三酮显色法测定。称取 5.0 g 样品(粉碎过 60 目筛)加水稀释至 50 mL。取 1 mL 稀释液加 3 mL 水、1 mL 水合茚三酮试剂及 1 mL 磷酸缓冲液,煮沸 15 min,冷却后定容至 25 mL 并于 570 nm 下测定其吸光度^[22]。以标准甘氨酸质量浓度为横坐标,吸光度 $A_{570 \text{ nm}}$ 为纵坐标制作标准曲线,得到标准曲线方程为 $y = 8.54x - 0.2268 (R^2 = 0.9988)$ 。游离氨基酸总量以质量分数(%)表示,按下式进行计算:

游离氨基酸总量(%) = [测定的吸光度对应的甘氨酸质量(mg) × 试液总量(mL)] × 100 / [样品干基质量(g) × 测定液体积(mL) × 1000]

1.2.4.9 维生素 C 含量测定 参考 GB 5009.86-2016 方法测定。称取 5.0 g 粉碎过 60 目筛的样品,加入 TCA 溶液提取后过滤,取 1 mL 滤液,加入 1.0 mL TCA、1.0 mL BP-乙醇溶液等,充分反应后于 534 nm 处测定吸光值。以标准抗坏血酸质量浓度为横坐标,吸光度 A_{534} 为纵坐标制作标准曲线,得到标准曲线方程为 $y = 0.0048x + 0.0034 (R^2 = 0.9988)$ 。样品中维生素 C 含量以毫克每百克(mg/100 g)计,按下式进行计算:

维生素 C 含量(mg/100 g) = [样品提取液总体积(mL) × 查得的抗坏血酸质量(μg)] × 100 / [测定提取液体积(mL) × 样品质量(g) × 1000]

1.3 数据处理

所有数据均经过三次平行试验获得,取平均值。采用 Design Expert 8.0 软件进行试验设计,Origin 8.0 和 SAS 软件进行绘图及统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 转换点干基含水率对香菇干燥特性及品质的影响 热风干燥是一个减速干燥过程,干燥后期含水率越低,干燥速率越慢,耗时越长;而微波干燥速

率非常快,可以极大的缩短干燥时间^[8-9,12,20]。从图 1 可以看出联合干燥的耗时均小于单一热风干燥,缩时 48.65%~80.83%。从热风干燥转换至微波干燥时的干基含水率越高,微波干燥阶段的干燥速率越大。这是由于香菇的含水量越高介电性越强,微波加热时就会吸收越多的能量从而使干燥速度极大的提升。在微波干燥初期存在加速阶段,是因为香菇表面水分先受热蒸发,子实体内外部产生的温度梯度促进水分向外表迁移,与 Bakhara 等^[8]、Das 等^[9] 研究蘑菇的快速干燥结果相一致。

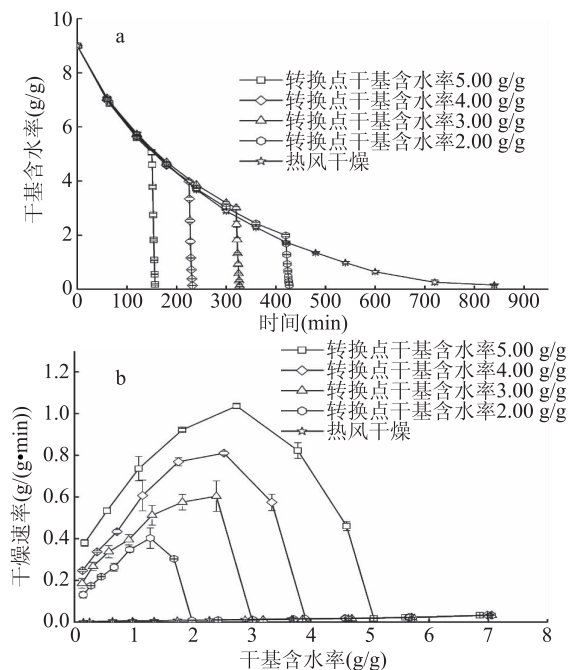


图1 转换点干基含水率对香菇干燥特性的影响

Fig.1 Effects of dry basis moisture content at switching point on the drying characteristics of shiitakes
注:a:时间-干基含水率曲线;

b:干基含水率-干燥速率曲线;图3、图5同。

干燥过程中香菇在热风和微波的作用下大量失水出现皱缩,同时表面发生褐变产生色差。随着转换到微波干燥的干基含水率的降低,色差降低,收缩率下降(表2),但其收缩率高于热风干燥。这可能是因为微波加重了子实体的褐变,且子实体内部受热膨胀,在温度下降之后急剧收缩导致收缩率增大^[20]。其中转换点干基含水率 2.00 g/g 的收缩率与单一热风干燥相接近,可能是由于含水率越低,水分流失越慢,物料收缩越不明显。随着转换点干基含水率的降低能耗增加,联合干燥各组相比单一热风干燥可节省用电 32.75%~69.00%。联合干燥各组的复水比均低于单一热风干燥,可能是由于微波干燥过程香菇表面皱缩严重导致复水困难,与黄姬俊等^[6] 研究香菇微波真空干燥的结果相一致。

如图 2,香菇在干燥过程中营养成分随水分的蒸发而流失,随转换点干基含水率的降低而降低,联合干燥的营养成分均高于单一热风干燥,这可能是由于热风处理时间过长,多糖结构被破坏,氨基酸与还原糖发生美拉德及焦糖化反应导致营养成分流失较

表2 转换点干基含水率对香菇外部品质及能耗的影响

Table 2 Effect of dry basis moisture content at switching point on external quality and energy consumption of shiitakes

转换点干基含水率(g/g)	色差 ΔE	收缩率(%)	能耗(kW/h)	复水比
5.00	14.52 ± 0.85 ^a	79.54 ± 0.92 ^a	0.53 ± 0.01 ^e	3.02 ± 0.05 ^b
4.00	14.23 ± 0.42 ^a	76.15 ± 1.24 ^{ab}	0.75 ± 0.02 ^d	2.98 ± 0.09 ^b
3.00	11.28 ± 0.57 ^{ab}	71.94 ± 1.57 ^b	0.94 ± 0.03 ^c	3.10 ± 0.13 ^b
2.00	10.74 ± 0.24 ^{ab}	64.37 ± 0.79 ^c	1.15 ± 0.03 ^b	3.07 ± 0.03 ^b
热风干燥	8.27 ± 0.92 ^b	62.48 ± 1.37 ^c	1.71 ± 0.04 ^a	3.61 ± 0.21 ^a

注:同列字母不同表示差异显著($p < 0.05$);表3~表4同。

多,而微波干燥时间极短,其营养物质也被极大程度的保留下来,这与王洪彩^[20]、Tian等^[21]研究热风、微波干燥整株香菇的结果较一致。综合干燥时间及品质指标,发现转换点干基含水率为5.0 g/g时干香菇色差及收缩率最大,褐变及皱缩严重;转换点干基含水率为2.0 g/g时干燥耗时较长且香菇多糖等营养成分含量较低;转换点干基含水率为3.0、4.0 g/g时干燥时间较短且色差、收缩率及能耗较低,营养成分较高;则选择转换点干基含水率3.0、4.0 g/g的中间点3.50 g/g为响应面优化试验的零水平。

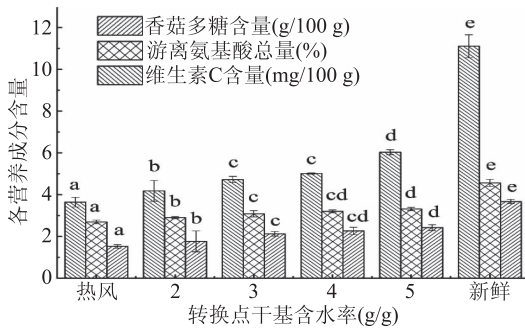


图2 转换点干基含水率对香菇营养成分的影响
Fig.2 Effect of dry basis moisture content at switching point on the nutrient composition of shiitakes
注:同一营养成分含量字母不同表示差异显著($p < 0.05$);图4、图6同。

2.1.2 热风温度对香菇干燥特性及品质的影响 由图3a可知热风温度越高,水分含量下降越快,干燥耗时越短,与李艳杰等^[22]研究热风干燥香菇的结果相一致。如图3b热风干燥初期干燥速率随热风温度的增加而明显增加;干燥至中期自由水含量减少,热风温度不能显著影响干燥速率,各组间速率差异缩小,与谢静等^[23]研究热风干燥香菇脆片的结果相一致。微波阶段的干燥速率被前阶段热风温度所影响,可能是由于不同的热风温度对香菇内部结构产生不同程度的破坏,从而导致在微波阶段水分流失速度不同,具体表现为热风阶段的温度越高后期转入微波干燥时的速率越快(图3b)。

表3为不同热风温度对香菇色差、收缩率、能耗及复水性的影响。随着温度的升高,色差先减小再增加,可能是高温加剧美拉德反应使香菇褐变严重;香菇收缩率无显著变化。电热干燥箱的耗能与其工作温度及工作时间有关,50.0℃组的能耗最高。各组复水比无显著差异,其中70.0℃组复水性最低,可能是高温对香菇内部结构破坏较大导致其持水能力

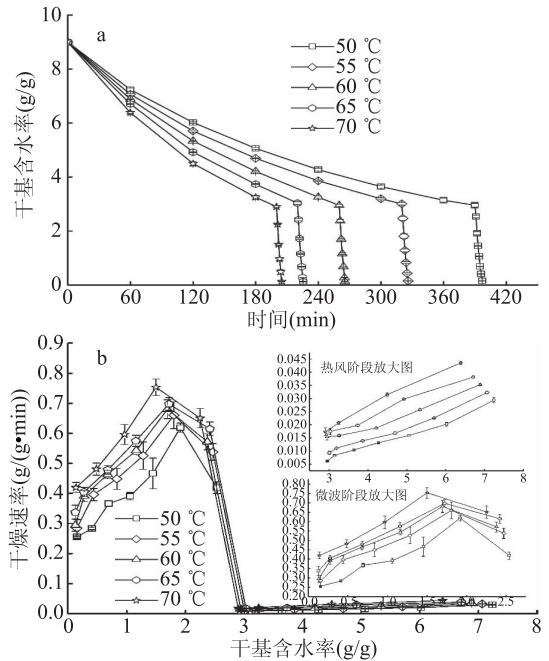


图3 热风温度对香菇干燥特性的影响
Fig.3 Effects of hot air temperature on drying characteristics of shiitakes

下降^[8]。

随温度的升高,不同热风温度组间营养成分变化不明显。如图4所示,香菇多糖和游离氨基酸含量在60.0℃时达到最高,这可能是由于低温时热风干燥时间长,营养流失较多,而高温加速了美拉德反应,导致氨基酸和糖类含量降低^[21]。香菇中V_c含量在55.0℃处理时最大,之后随温度的升高含量下降,是因为高温促进了V_c的降解致使其含量降低,与吕佳宁等^[24]研究低温热风干燥香菇的结果相同。综合各项指标,发现温度范围在50.0~65.0℃之间获得的干香菇色差及收缩率较小,复水比较高且香菇多糖、游离氨基酸及维生素C含量较多;温度在70.0℃时干香菇色差及收缩率均最高,复水比最低且各营养成分含量也最低,因此选择50.0~65.0℃范围作为响应面优化试验的水平范围。

2.1.3 微波功率密度对香菇干燥特性及品质的影响 图5为不同微波功率密度对香菇干燥特性影响曲线,可以看出微波功率密度越高,耗时越短。微波阶段的干燥速率随功率升高而加快,这可能是由于作用于香菇的微波强度增加,香菇内部水分输送速度加快,与高伦江等^[25]研究微波干燥香菇的干燥特性结果一致。

表3 热风温度对香菇外部品质及能耗的影响

Table 3 Effects of hot air temperature on external quality and energy consumption of shiitakes

热风温度(°C)	色差 ΔE	收缩率(%)	能耗(kW/h)	复水比
50.0	10.23 ± 0.31 ^b	72.38 ± 2.03 ^a	1.06 ± 0.01 ^a	3.19 ± 0.12 ^a
55.0	9.92 ± 0.49 ^b	70.67 ± 1.45 ^a	0.97 ± 0.03 ^b	3.11 ± 0.09 ^a
60.0	10.47 ± 0.62 ^b	67.35 ± 1.15 ^a	0.89 ± 0.02 ^c	3.08 ± 0.21 ^a
65.0	11.25 ± 0.52 ^b	68.22 ± 1.43 ^a	0.93 ± 0.02 ^d	3.24 ± 0.12 ^a
70.0	14.95 ± 0.46 ^a	74.35 ± 2.12 ^a	0.89 ± 0.02 ^c	2.92 ± 0.15 ^a

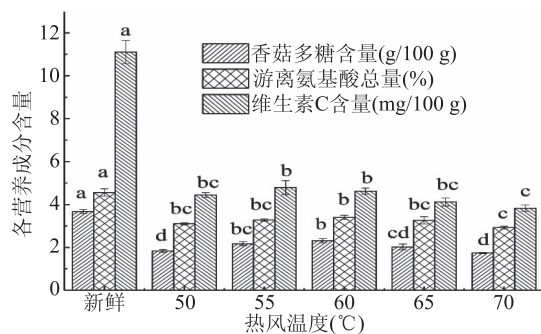


图4 热风温度对香菇营养成分的影响

Fig.4 Effects of hot air temperature on the nutrient composition of shiitakes

由表4可以看出香菇的色泽变化与微波功率密度及微波处理时间有关,26.67 W/g组微波时间过长,33.33 W/g组功率过高,均引起香菇内部温度升高,外部水分无法及时蒸发,引起褐变^[21,26-27]。微波功率密度20.00、26.67 W/g的香菇收缩率较低,26.67 W/g组的香菇复水性最高,但不同微波功率密度处理的各组香菇在收缩率及复水比上均无显著变化,各组间能耗差异也很小,这可能是由于相同的热风处理之后各组香菇在内部结构及外部形状上十分相似,而微波处理时各组的处理时间也非常接近所致。

由图6可知随微波功率密度的增加,香菇多糖含量、游离氨基酸总量及V_c含量均呈现先增加再降低的趋势。香菇多糖及游离氨基酸含量在20.00及26.67 W/g时较大,可能是由于微波处理时间越长,营养流失越多,同时微波功率密度过高也会加快营养物质的流失^[14]。微波功率密度在20.00~26.67 W/g时干香菇色差、收缩率及能耗均最低,各营养成分含量也较高;微波功率密度在6.67~13.33 W/g及33.33 W/g时色差及收缩率较大,香菇多糖及维生素C含量较低;因此选择微波功率密度20.00~26.67 W/g的中间点23.33 W/g为零水平进行响应面优化试验。

2.2 响应面优化试验结果

2.2.1 响应面试验设计方案与结果

表4 微波功率密度对香菇外部品质及能耗的影响

Table 4 Effects of microwave power density on external quality and energy consumption of shiitakes

微波功率密度(W/g)	色差 ΔE	收缩率(%)	能耗(kW/h)	复水比(g/g)
6.67	15.62 ± 1.84 ^a	76.36 ± 2.45 ^a	0.90 ± 0.04 ^b	2.89 ± 0.11 ^a
13.33	11.81 ± 1.23 ^{ab}	73.84 ± 2.03 ^a	0.90 ± 0.05 ^b	2.93 ± 0.21 ^a
20.00	10.35 ± 0.48 ^b	69.12 ± 1.57 ^a	0.88 ± 0.05 ^{ab}	2.98 ± 0.01 ^a
26.67	9.46 ± 1.36 ^b	68.89 ± 2.33 ^a	0.87 ± 0.04 ^a	3.15 ± 0.16 ^a
33.33	11.32 ± 0.83 ^{ab}	71.89 ± 1.78 ^a	0.87 ± 0.05 ^a	2.90 ± 0.06 ^a

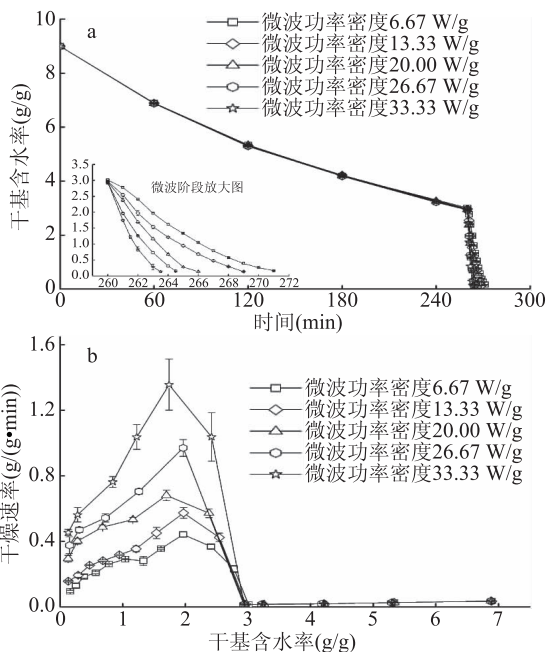


图5 微波功率密度对香菇干燥特性的影响

Fig.5 Effects of microwave power density on the drying characteristics of shiitakes

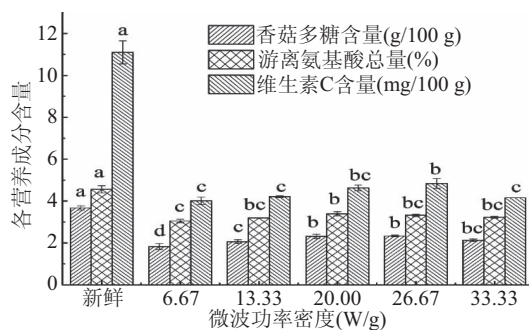


图6 微波功率密度对香菇营养成分的影响

Fig.6 Effects of microwave power density on the nutrient composition of shiitakes

结果可知,不同干燥条件下的香菇样品复水性差异

表5 响应面试验设计方案及结果

Table 5 Experimental design and results for response surface analysis

序号	X ₁ (g/g)	X ₂ (°C)	X ₃ (W/g)	Y ₁ (min)	Y ₂ 色差	Y ₃ (%)	Y ₄ (%)	Y 综合评分
1	3.50	57.5	23.34	212.50	10.74	66.25	62.66	0.099
2	3.50	57.5	23.34	221.33	11.01	66.47	61.09	0.080
3	3.50	65.0	30.00	162.00	11.88	64.94	62.09	0.109
4	4.50	57.5	30.00	160.33	10.72	70.34	64.56	0.132
5	3.50	50.0	16.67	293.50	11.79	72.65	52.25	-0.045
6	4.50	65.0	23.34	133.33	12.42	68.89	67.21	0.148
7	3.50	57.5	23.34	202.13	11.41	65.78	62.36	0.095
8	3.50	65.0	16.67	169.67	11.81	66.36	55.67	0.056
9	2.50	57.5	30.00	281.50	10.26	63.54	59.27	0.049
10	3.50	57.5	23.34	209.67	11.18	65.27	64.06	0.108
11	2.50	65.0	23.34	241.50	10.64	65.56	54.55	0.026
12	3.50	57.5	23.34	218.33	11.04	64.85	62.06	0.091
13	4.50	50.0	23.34	184.13	12.94	73.93	55.45	0.019
14	3.50	50.0	30.00	302.33	12.34	70.09	53.08	-0.044
15	4.50	57.5	16.67	156.17	11.57	71.28	62.92	0.11
16	2.50	50.0	23.34	392.67	10.62	69.47	50.44	-0.089
17	2.50	57.5	16.67	306.33	8.62	65.30	57.86	0.042

表6 回归方程方差分析表

Table 6 Variance analysis of regression equation

方差来源	干燥时间(min)	色差 ΔE	收缩率(%)	多糖保留率(%)	综合评分
模型	<0.0001 **	<0.0001 **	0.0004 **	0.0004 **	<0.0001 **
X ₁	<0.0001 **	<0.0001 **	<0.0001 **	0.0003 **	<0.0001 **
X ₂	<0.0001 **	0.1551	0.0001 **	0.0002 **	<0.0001 **
X ₃	0.5869	0.0482 *	0.0369 *	0.0419 *	0.0679
X ₁ X ₂	0.0043 **	0.2365	0.5577	0.0349 *	0.6228
X ₁ X ₃	0.2705	0.0006 **	0.6686	0.9396	0.5986
X ₂ X ₃	0.5178	0.2876	0.5543	0.0981	0.0976
X ₁ ²	0.1458	0.0011 **	0.0155 *	0.9174	0.7525
X ₂ ²	0.0345 *	<0.0001 **	0.0013 **	0.0001 **	<0.0001 **
X ₃ ²	0.5582	0.0490 *	0.3291	0.1322	0.2090
失拟性	0.0845	0.7914	0.1567	0.1595	0.1782
R ²	0.9864	0.9808	0.9611	0.9609	0.9819

注: * 表示显著水平, $p < 0.05$; ** 表示极显著水平, $p < 0.01$ 。

较小,干燥时间与能耗变化情况较一致,各营养成分变化规律较一致,结合 Box-Behnken 中心组合设计原理,选择转换点干基含水率 X₁、热风温度 X₂ 和微波功率密度 X₃ 三个因素进行香菇热风微波联合干燥优化试验,测定干燥时间(Y₁)、色差 ΔE(Y₂)、收缩率(Y₃)和多糖保留率(Y₄),按照各指标的最大值为参照进行归一化,赋予不同的权重系数进行多指标综合评分,权重系数:干燥时间 0.2,色差及收缩率 0.15,多糖保留率 0.5,计算综合评分^[18,28-29],试验方案及结果见表 5。

$$\text{综合评分 } Y = -0.2Y_1/392.67 - 0.15Y_2/12.94 - 0.15Y_3/73.93 + 0.5Y_4/67.21$$

2.2.2 回归方程方差分析和回归系数显著性检验

利用 Design-Expert 软件对结果进行多元回归拟合,得出转换点干基含水率、热风温度、微波功率密度与干燥时间、色差、收缩率、多糖保留率及综合评分之

间的二次多项回归方程:

$$Y_1 = 212.79 - 73.51X_1 - 58.27X_2 - 2.44X_3 + 25.09X_1X_2 + 7.25X_1X_3 - 4.12X_2X_3 + 9.66X_1^2 + 15.45X_2^2 + 3.63X_3^2$$

$$Y_2 = 11.08 + 0.94X_1 - 0.12X_2 + 0.18X_3 - 0.14X_1X_2 - 0.62X_1X_3 - 0.12X_2X_3 - 0.54X_1^2 + 1.12X_2^2 - 0.24X_3^2$$

$$Y_3 = 65.72 + 2.57X_1 - 2.55X_2 - 0.84X_3 - 0.28X_1X_2 + 0.21X_1X_3 + 0.29X_2X_3 + 1.42X_1^2 + 2.32X_2^2 + 0.47X_3^2$$

$$Y_4 = 62.45 + 3.50X_1 + 3.54X_2 + 1.29X_3 + 1.91X_1X_2 + 0.057X_1X_3 + 1.40X_2X_3 - 0.077X_1^2 - 5.46X_2^2 - 1.22X_3^2$$

$$Y = 0.095 + 0.048X_1 + 0.062X_2 + 0.010X_3 + 0.0035X_1X_2 + 0.00375X_1X_3 + 0.013X_2X_3 - 0.00218X_1^2 - 0.066X_2^2 - 0.00918X_3^2$$

对试验数据进行显著性分析发现(表 6),各指标模型均显著,失拟项均不显著,说明响应面试验可信度较高,模型可靠;各方程的决定系数 R² 值均大于

0.9,说明该回归方程对试验的拟合情况较好,因变量与全体自变量之间的多元回归关系显著。

影响干燥时间和综合评分的因素主次顺序为转换点干基含水率、热风温度 > 微波功率密度,其中转换点干基含水率和热风温度对干燥时间和综合评分有极显著影响($p < 0.01$)。影响色差的因素主次顺序为转换点干基含水率 > 微波功率密度 > 热风温度,其中转换点干基含水率对色差影响极显著($p < 0.01$),微波功率密度对其影响显著($p < 0.05$)。影响收缩率的因素主次顺序为转换点干基含水率 > 热风温度 > 微波功率密度,其中转换点干基含水率和热风温度对收缩率有极显著影响($p < 0.01$),微波功率密度对其也有显著影响($p < 0.05$)。影响多糖保留率的因素主次顺序为热风温度 > 转换点干基含水率 > 微波功率密度,其中热风温度和转换点干基含水率对多糖保留率有极显著影响($p < 0.01$),微波功率密度对其有显著影响($p < 0.05$)。

2.2.3 交互作用分析 分别固定回归模型中任一因素于零水平,得到另外两个因素的双因素模型,见图7~图10。

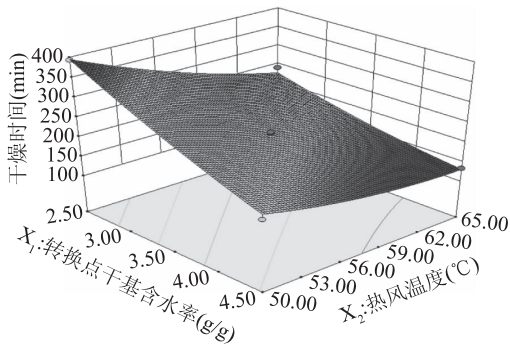


图7 转换点干基含水率和热风温度对干燥时间的影响
Fig.7 Effects of dry point moisture content and hot air temperature on drying time

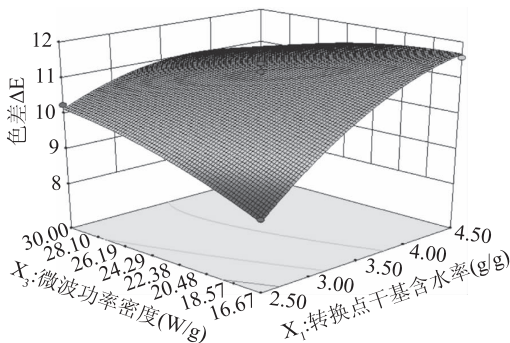


图8 转换点干基含水率和微波功率密度对色差的影响
Fig.8 Effects of conversion point dry basis moisture content and microwave power density on color difference

转换点干基含水率和热风温度对干燥时间的交互作用极显著($p < 0.01$),如图7所示,干燥时间随转换点干基含水率和热风温度的升高而降低。转换点干基含水率和微波功率密度对色差 ΔE 的交互作用显著($p < 0.05$),如图8所示,色差随转换点干基含水率及微波功率密度的降低而降低。转换点干基含水率和热风温度对多糖保留率的交互作用极显著($p <$

0.01),如图9所示,多糖保留率随转换点干基含水率的降低而降低,随温度的增加呈先升高后降低的趋势。由图10可知,综合评分随转换点干基含水率的降低而降低,随热风温度的升高呈先上升再下降的趋势;当转换点干基含水率一定,热风温度较高时,综合评分随微波功率密度的降低而降低。

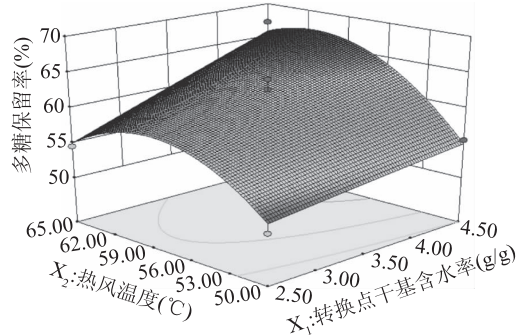


图9 转换点干基含水率和热风温度对多糖保留率的影响
Fig.9 Effects of conversion point dry basis moisture content and hot air temperature on polysaccharide retention rate

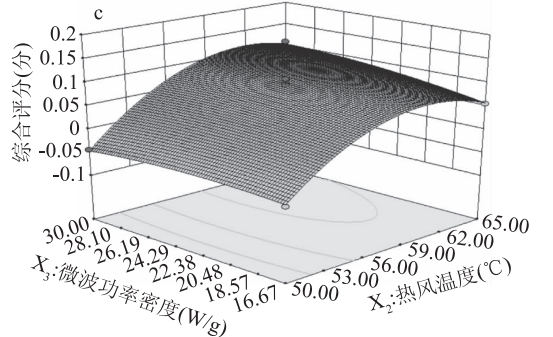
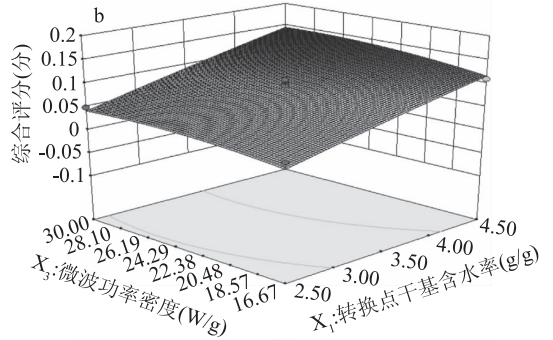
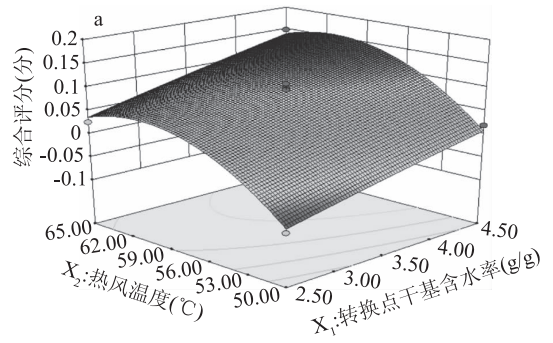


图10 三因素对综合评分的影响
Fig.10 Effects of three factors on the comprehensive score
注:a: X_1 和 X_2 对 Y 的交互作用;b: X_1 和 X_3 对 Y 的交互作用;c: X_2 和 X_3 对 Y 的交互作用。

2.2.4 综合评分验证实验 利用 Design Expert 软件对综合评分取最大值,得到香菇热风微波联合干燥的最优工艺条件为转换点干基含水率 4.19 g/g,热风温度 60.64 °C,微波功率密度 30.00 W/g,此条件下综合评分为 0.151。为便于参数控制,取转换点干基含水率 4.20 g/g,热风温度 60.6 °C,微波功率密度 30.00 W/g进行验证试验,测得干燥时间为 178.33 min,产品色差为 11.21,收缩率为 65.28%,多糖保留率为 66.98%,综合评分为 0.145,结果见表 7。验证值与预测值误差小于 4%,说明优化工艺参数可行。

表 7 响应面优化结果

Table 7 Results of response surface optimization

	转换点干 基含水率 (g/g)	热风温度 (°C)	微波功率 密度 (W/g)	综合评分
预测优化条件	4.19	60.64	30.00	0.151
试验验证	4.20	60.60	30.00	0.145

3 结论

本研究基于单因素及响应面试验对香菇热风微波联合干燥的工艺参数进行优化,探究了不同转换点干基含水率、热风温度及微波功率密度对香菇干燥特性及品质的影响。最优工艺参数为转换点干基含水率 4.20 g/g,热风温度 60.60 °C,微波功率密度 30.00 W/g,此条件下的干燥时间为 178.33 min,产品色差为 11.21,收缩率为 65.28%,多糖保留率为 66.98%,综合评分为 0.145。以上结果证明通过优化热风-微波联合干燥可在大幅度缩短干燥时间的基础上有效获得高品质的干香菇,本研究为香菇热风微波分段联合干燥工艺的生产应用奠定基础。

参考文献

[1] 谷镇.食用菌呈香呈味物质分析及制备工艺研究[D].上海:上海师范大学,2012:2-9.

[2] Li B, Pei F, Chen S, et al. Non-volatile flavour components in *Lentinus edodes* after hot water blanching and microwave blanching [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20: S2532-S2542.

[3] 徐晓飞, 向莹, 张小爽. 不同干燥方式对香菇品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 259-262.

[4] Li S, Wang A, Liu L, et al. Evaluation of nutritional values of shiitake mushroom stipes [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3): 2012-2019.

[5] Kumar A, Singh M, Singh G. Effect of different pretreatments on the quality of mushrooms during solar drying [J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 50(1): 165-170.

[6] 黄姬俊. 香菇微波真空干燥技术的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 2-4, 20-26.

[7] Yang W, Du H, Mariga A M, et al. Hot air drying process promotes lignification of *Lentinus edodes* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84: 726-732.

[8] Bakhara C K, Pal U S, Bal L M. Drying characteristic and physico-chemical evaluation of tender jackfruit slices during osmo-convective drying [J]. Food Measure, 2018, 12: 564-572.

[9] Das I, Arora A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 208-219.

[10] Talens C, Castro M, Fito P J. Effect of microwave power coupled with hot air drying on sorption isotherms and microstructure of orange peel [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(4): 723-734.

[11] 李斌, 别玉, 张伟. 不同香菇干燥方式的干燥特性和干品品质对比研究 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 175-179.

[12] Wang H, Zhang M, Adhikari B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 94: 507-517.

[13] Wang H, Zhang M, Mujumdar A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1791-1802.

[14] Wei Q, Huang J, Zhang Z, et al. Effects of different combined drying methods on drying uniformity and quality of dried taro slices [J]. Drying Technology, 2018(11): 1-9.

[15] Politowicz J, Lech K, Lipan L, et al. Volatile composition and sensory profile of shiitake mushrooms as affected by drying method [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1511-1521.

[16] Apinyavisit K, Nathakaranakule A, Soponronnarit S, et al. A comparative study of combined microwave techniques for longan drying with hot air or vacuum [J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(7): 161-169.

[17] Jiang N, Liu C, Li D, 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.

[18] 池春欢, 汪云友, 陈厚荣. 多指标综合评分法优化辣椒热泵-微波联合干燥工艺 [J]. 食品与发酵工业, 2018(6): 172-179.

[19] Dinani S T, Havet M. Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 70: 417-426.

[20] 王洪彩. 香菇中短波红外干燥及其联合干燥研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014: 24-32.

[21] Tian Y, Zhao Y, Huang J, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 714-722.

[22] 李艳杰, 高衍红, 王鹏. 香菇热风干燥工艺优化及其对主要营养物质和抗氧化活性的影响 [J]. 食品科学, 2017(6): 209-214.

[23] 谢静, 赵阿丹, 熊善柏, 等. 干燥方式对酥脆香菇品质的影响 [J]. 食品科学, 2012(13): 87-91.

[24] 吕佳宁, 李影, 韩立杰. 不同干燥方法对生食香菇品质的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(2): 46-50.D

[25] 高伦江, 曾顺德, 李晶, 等. 热风微波联合干燥对香菇品质及风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2017(21): 80-83.

(下转第 232 页)

参考文献

- [1] 王璇, 刘军弟, 邵砾群, 等. 我国苹果产业年度发展状况及其趋势与建议[J]. 中国果树, 2018(3): 101-104, 108.
- [2] 陈亚东. 我国苹果产业数据资源建设与整合研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [3] 王怡芬, 陈锡龙, 张东, 等. 新疆野苹果与栽培苹果挥发性香气物质分析[J]. 北方园艺, 2018(3): 46-54.
- [4] 卢明艳, 刘珩, 孙守文, 等. 3个苹果品种果实香气物质研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(10): 1796-1803.
- [5] 聂继云. 苹果的营养与功能[J]. 保鲜与加工, 2013(6): 56-59.
- [6] 李泰山, 韩卫娟, 杜改改, 等. 杏李不同品种果实香气成分分析[J]. 林业科学, 2017, 53(9): 123-132.
- [7] 苑兆和, 尹燕雷, 李自峰, 等. 石榴果实香气物质的研究[J]. 林业科学, 2008(1): 65-69.
- [8] 李自峰, 张可群, 朱丽琴, 等. 2007. 曹州木瓜果实香气物质的研究[J]. 林业科学, 2007(7): 22-29.
- [9] 刘珩, 卢明艳, 王涛, 等. 套袋对早富1号苹果果实香气成分的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2017(5): 70-73.
- [10] 樊丽, 向春燕, 任小林. '蜜脆'苹果采后贮藏期间香气成分的变化[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(12): 160-166.
- [11] 许宝峰, 李成, 孙建设. 低温贮藏和成熟度对王林苹果香气成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(13): 130-133.
- [12] Seppä L, Peltoniemi A, Tahvonon R, et al. Flavour and texture changes in apple cultivars during storage [J]. Lwt - food Science and Technology, 2013, 54(2): 500-512.
- [13] Varela P, Salvador A, Fiszman S. Shelf-life estimation of 'Fuji' apples: II. The behavior of recently harvested fruit during storage at ambient conditions [J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 50(1): 64-69.
- [14] Moyaleon M A, Vergara M, Bravo C, et al. Development of aroma compounds and sensory quality of 'Royal Gala' apples during storage [J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 2007, 82(3): 403-413.
- [15] 叶萌祺. 苹果酒酿造过程香气物质调控及 FT-NIRS 分析方法研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2015.
- [16] Dixon J, Hewett E W. Factors affecting apple aroma/flavor volatile concentration: A review [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2000, 28(3): 155-173.
- [17] Mehinagic E, Royer G, Symoneaux R, et al. Characterization

of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivar and maturity stage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2678-2687.

- [18] López M L, Villatoro C, Fuentes T, et al. Volatile compounds, quality parameters and consumer acceptance of 'Pink Lady' apples stored in different conditions [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(1): 55-66.
- [19] Echeverría G, Graell J, Lara I, et al. Physicochemical measurements in 'Mondial Gala' apples stored at different atmospheres: Influence on consumer acceptability [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 50(2): 135-144.
- [20] Echeverría G, Fuentes T, Graell J, et al. Aroma volatile compounds of 'Fuji' apples in relation to harvest date and cold storage technology: A comparison of two seasons [J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 32(1): 29-44.
- [21] 田长平, 魏景利, 刘晓静, 等. 梨不同品种果实香气成分的 GC-MS 分析[J]. 果树学报, 2009, 26(3): 294-299.
- [22] 王娟, 孙瑞, 王桂霞, 等. 8个草莓品种(系)果实特征香气成分比较分析[J]. 果树学报, 2018, 35(8): 967-976.
- [23] 张薇薇, 张秀玲. 基于主成分分析和聚类分析的苹果香气成分比较及品种分类研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 217-224.
- [24] 邓健康, 刘璇, 吴昕焯, 等. 苹果汁香气物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 386-390.
- [25] Contreras C, Beaudry R. Lipoxygenase-associated apple volatiles and their relationship with aroma perception during ripening [J]. Postharvest Biology & Technology, 2013, 82(1): 28-38.
- [26] 李淑玲, 冯建荣, 李亚兰, 等. 引入石河子地区的苹果品种果实香气成分的 GC-MS 检测[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(6): 1046-1051.
- [27] 刘满然, 石金瑞, 刘翠华, 等. 陕西不同产区苹果香气物质差异分析[J]. 西北农业学报, 2018, 27(8): 1173-1183.
- [28] 孙蕊, 慈琰雨, 赵玲玲, 等. 14个栽培品种对富士授粉后果实香气成分分析[J]. 烟台果树, 2018(2): 24-25.
- [29] 王超, 陆文利, 陈晓流, 等. 顶空和固相微萃取测定苹果芳香物质的比较[J]. 实验室科学, 2016, 19(3): 41-44.
- [30] 李杰, 韩继成. 果实香气物质分析研究进展[J]. 北方果树, 2018(6): 1-3.
- [31] 王海波, 陈学森, 辛培刚, 等. 几个早熟苹果品种香气成分的 GC-MS 分析[J]. 果树学报, 2007, 24(1): 11-15.

(上接第 221 页)

- [26] Cao X, Zhang M, Fang Z, et al. Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods [J]. Drying Technology, 2017, 35(2): 240-248.
- [27] 周韵, 宋春芳, 崔政伟. 热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J]. 农业工程学报, 2011(2): 382-386.

[28] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰, 等. 香菇中短波红外-脉动压差闪蒸联合干燥工艺研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 155-164.

[29] 王安建, 刘丽娜, 魏书信, 等. 响应面法优化香菇热泵干燥工艺[J]. 食品科技, 2016(3): 62-66.

权威·核心·领先·实用·全面