

响应面优化仙草微波间歇-热风联合干燥工艺及其对仙草凝胶品质的影响

唐小闲, 何思婷, 段振华, 刘 艳, 段伟文, 唐美玲, 高 丹

Response Surface Optimization of *Mesona* Microwave Intermittent-Hot Air Combined Drying Process and Its Effect on *Mesona* Gel Quality

TANG Xiaoxian, HE Siting, DUAN Zhenhua, LIU Yan, DUAN Weiwen, TANG Meiling, and GAO Dan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050288>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

响应面法优化香菇热风-微波联合干燥工艺

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

食品工业科技. 2019, 40(14): 214-221,232

热蒸汽烫漂联合热风微波耦合干燥香菇的工艺优化

Optimization of the Technology of Hot Steam Blanching Coupled with Hot Air-microwave Combined Drying Process of Shiitakes

食品工业科技. 2020, 41(13): 59-64,71

即食鲱鱼肉干的调味配方及微波-热风干燥工艺优化

Optimization of Seasoning Formula and Microwave-Hot Air Drying Technology for Ready-to-eat Dried Mackerel

食品工业科技. 2021, 42(16): 171-176

热风、微波及其联合干燥对蒜片品质的影响

Effect of Hot Air, Microwave and Combined Drying on the Quality of Garlic(*Allium sativum*) Slices

食品工业科技. 2018, 39(15): 136-140,146

响应面法优化微波-热风脱水冻豆腐干燥工艺及其品质评价

Optimization of Microwave-Hot Air Dehydration Process and Quality Evaluation of Frozen Tofu by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2021, 42(23): 158-166

响应面法优化板枣热风-真空分段联合干燥工艺

Optimization of Hot Air-vacuum Segment-combined Drying Process of Jishan Jujube by Response Surface Method

食品工业科技. 2020, 41(3): 131-138



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐小闲,何思婷,段振华,等. 响应面优化仙草微波间歇-热风联合干燥工艺及其对仙草凝胶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 203–211. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050288

TANG Xiaoxian, HE Siting, DUAN Zhenhua, et al. Response Surface Optimization of *Mesona* Microwave Intermittent-Hot Air Combined Drying Process and Its Effect on *Mesona* Gel Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(3): 203–211. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050288

· 工艺技术 ·

响应面优化仙草微波间歇-热风联合干燥工艺 及其对仙草凝胶品质的影响

唐小闲^{1,2}, 何思婷¹, 段振华^{1,2,*}, 刘 艳^{1,2}, 段伟文¹, 唐美玲¹, 高 丹^{1,2}

(1. 贺州学院食品与生物工程学院/食品科学与工程技术研究院, 广西贺州 542899;

2. 广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西贺州 542899)

摘 要:以仙草为研究对象, 采用微波间歇-热风联合干燥方式, 探讨微波功率、微波间歇时间、联合干燥转换点含水率及热风干燥温度对仙草多糖提取率的影响, 采用 Box-Behnken 进行优化, 并比较不同干燥方式处理仙草对其多糖提取率及凝胶品质的影响。结果表明, 通过响应面优化试验获得最优工艺为微波功率为 403 W, 微波间歇时间为 60 s, 转换点含水率为 42%, 热风干燥温度为 74 ℃, 此条件下仙草多糖提取率为 13.60%。微波间歇-热风联合干燥仙草的多糖提取率高于热泵干燥仙草的多糖提取率 (12.36%) 和晾晒干燥仙草的多糖提取率 (12.78%), 干燥时间仅是后两种干燥方式的 1.44%~16.67%, 所制作的凝胶样品硬度 (516.60±8.54) g、弹性为 (0.83±0.01) 和回复性 (0.33±0.01) 均较为适中, 凝胶体内聚性 (0.48±0.01) 稍小, 胶粘性 (359.68±11.56) g 和咀嚼性 (285.54±13.21) g 较高, 凝胶样品质构特性和感官评分较优。综合比较, 微波间歇-热风联合干燥更适合于仙草干燥。

关键词:仙草, 微波间歇-热风联合干燥, 工艺优化, 多糖提取率, 凝胶品质

中图分类号: TS255.36

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)03-0203-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050288



本文网刊:

Response Surface Optimization of *Mesona* Microwave Intermittent-Hot Air Combined Drying Process and Its Effect on *Mesona* Gel Quality

TANG Xiaoxian^{1,2}, HE Siting¹, DUAN Zhenhua^{1,2,*}, LIU Yan^{1,2}, DUAN Weiwen¹, TANG Meiling¹, GAO Dan^{1,2}

(1. College of Food and Biological Engineering, Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou 542899, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou 542899, China)

Abstract: Taking *Mesona blumes* as the research object, the effects of microwave power, microwave intermittent time, drying point and drying temperature on the extraction rate of polysaccharides were studied with the microwave intermittent hot air drying method. The effects of different drying methods on the extraction rate and gel quality of Box-Behnken were studied. The results showed that the optimal process was as follows: The microwave power was 403 W, the microwave intermittent time was 60 s, the moisture content at the conversion point was 42%, the hot air drying temperature was 74 ℃, and the extraction rate of *Mesona blumes* polysaccharide was 13.60%. The extraction rate of polysaccharides from the microwave intermittent hot air drying was higher than the heat pump dried (12.36%) and sun-cure dried (12.78%). The drying time was only 1.44% to 16.67% of the latter two drying methods. The hardness of the gel samples (516.60±8.54) g, elasticity (0.83±0.01) and recovery (0.33±0.01) were all moderate. In the gel the cohesion (0.48±0.01) was slightly smaller,

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 现代食品加工新技术研究岗位创新人才培养示范基地建设项目 (桂科 AD17195088); 广西高校中青年教师基础能力提升项目 (2019KY0719); 贺州市创新驱动发展专项 (贺科创 PT1907006)。

作者简介: 唐小闲 (1984-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: tangxiaoxian2016@163.com。

*** 通信作者:** 段振华 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 现代食品加工技术, E-mail: dzh65@126.com。

the adhesive viscosity (359.68 ± 11.56) g and chewiness (285.54 ± 13.21) g were higher, and the texture characteristics and sensory score of the gel samples were better. Comprehensive comparison, the microwave intermittent-hot air combined drying was more suitable for *Mesona blumes* drying.

Key words: *Mesona blumes*; microwave intermittent-hot air combined drying; process optimization; extraction rate of polysaccharide; gel quality

仙草(*Mesona blumes*), 别称凉粉草、仙人草, 属唇形科凉粉草属一年生草本宿根植物, 主要分布于我国台湾、福建、广东、广西等地^[1]。仙草性凉、味甘淡, 可用于治中暑、热毒、高血压、肾脏病、糖尿病、关节肌肉疼痛等^[2]。在民间常将仙草晒干后加水煮汁制成凉粉、仙草冻等, 其具有排毒养颜, 解热利尿的功效, 是盛夏酷暑的解渴佳品。仙草中富含蛋白质、氨基酸、脂肪、维生素、色素、钙、锌、铁、锰、钾、多糖、酸类、黄酮等多种化学成分^[3]。仙草凝胶占仙草干基重的 20% 左右, 其主要成分为具有凝胶性的多糖^[4], 具有促进凝胶、抑菌和抗氧化等功能^[5], 仙草多糖是企业生产凉茶饮料、凉粉、烧仙草和龟苓膏等食品不可或缺的原辅料。企业通过收购仙草干进行多糖提取生产制作仙草产品, 因此多糖提取率是企业收购仙草干的一项重要标准, 也是决定仙草干价格的一项重要指标。

仙草是一种季节性较强的农作物, 干燥是仙草在贮藏及加工中的一项重要手段。部分农户在田间收割仙草时直接就地晾晒干燥, 晾晒干燥效果容易受天气变化的影响, 干燥效率较低。在工业上以热风干燥较为普遍, 热风干燥虽然操作简单处理量大, 但干燥速度慢, 干燥时间长, 会造成产品严重褐变^[6], 降低其品质, 使有效成分严重流失^[7]; 另一种常见干燥方式为微波干燥, 微波干燥方式虽能极大提高干燥效率, 缩短干燥时间, 但其干燥均匀性较差, 难以保障干制品的品质^[8], 且干燥终点不易控制, 容易烧焦^[9-10]。因此, 综合热风干燥和微波干燥特点, 针对单一干燥方式存在的不足, 将微波干燥与热风干燥两种方式联合, 优势互补, 达到缩短干燥时间、提高产品品质、降低干燥能耗的目的^[11-12]。

目前已有学术者将微波-热风干燥方式对植物中糖类物质含量影响作了相关研究, 其中, 微波-热风干燥松茸的研究表明, 在不同干燥温度条件下, 间歇干燥时松茸多糖含量高于耦合干燥时多糖含量^[13]。微波-热风干燥苹果果干还原糖含量高于热风干燥样品^[14]。微波-热风联合干燥方式对样品的糖类物质保留效果良好, 而目前关于仙草微波间歇-热风联合干燥对仙草多糖提取以及凝胶影响的研究尚未见报道。为解决目前农户晾晒及工厂热风干燥仙草存在的问题, 并通过干燥方式将多糖等有效成分最大程度地保留下来, 提高多糖提取率及仙草凝胶产品品质, 有必要开展仙草微波间歇-热风联合干燥试验的研究。

本实验以仙草为原料, 研究微波间歇-热风联合干燥条件对仙草多糖提取率的影响, 在单因素实验基

础上, 通过响应面法优化干燥工艺, 获得最佳工艺参数。并通过比较微波间歇-热风、热泵干燥、晾晒方式处理仙草所提取的总糖含量及仙草凝胶品质, 确定一种最合适仙草的干燥方式, 旨在为仙草加工工业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜仙草 广东增城农户; 木薯淀粉 贺州市华生购物广场; 浓硫酸 分析纯, 西陇科学股份有限公司; 苯酚 分析纯, 广东光华科技股份有限公司; 葡萄糖 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; 碳酸钠 (98%) 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

ZWH-KFY-BT4I(HG) 闭环除湿热泵干燥机

东莞市正旭新能源设备科技有限公司; G70D20CN1P-D2(S0) 格兰仕微波炉 广东格兰仕微波炉生活电器制造有限公司; H-1 高速万能粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司; 722 可见分光光度计 上海优科仪器仪表有限公司; JJ1000 型电子天平 常熟市双杰测试仪器厂; HZT-JA500 分析天平 福州华志科学仪器有限公司; DK-98-II A 电热恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司; S-081 TA.XT Plus 质构仪 英国 SMS 公司; MX-50 水分测定仪 广州市艾安得仪器有限公司; H-1 微型混合器 上海康禾光电仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程 新鲜仙草→清洗→沥干水分→切段→铺料→微波间歇干燥→热风干燥→粉碎→仙草多糖提取→凝胶制备

操作要点: 挑选新鲜仙草, 去除腐烂及带虫卵枝叶; 将仙草上泥沙等杂质清洗干净并沥干水分, 把仙草按长 3 ± 0.5 cm 切段, 称取仙草段 100 g 平铺在置物筐, 放入微波系统干燥箱, 设置好干燥条件, 干燥至指定湿基转换点含水率, 以下都称为转换点含水率(是指仙草在微波干燥后进入热风干燥时的湿基含水率), 转至一定热风干燥温度的电热鼓风干燥箱进行干燥, 干燥至湿基含水率 $\leq 13\%$, 停止加热, 将样品取出称重, 粉碎机粉碎装袋; 取仙草粉进行多糖提取制作凝胶。

1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 微波功率对仙草多糖提取率的影响 在切段仙草 100 g、微波间歇时间 60 s、转换点含水率 50%、热风干燥温度 65 ℃ 条件下, 考查微波功率 195、260、325、390、455 W 对仙草多糖提取率的影响。

1.2.2.2 微波间歇时间对仙草多糖提取率的影响
在切段仙草 100 g, 微波功率 390 W、转换点含水率 50%、热风干燥温度 65 ℃ 条件下, 考查微波间歇时间(是指微波每加热 2 min 后停止工作的时间段) 20、40、60、80 s 对仙草多糖提取率的影响。

1.2.2.3 转换点含水率对仙草多糖提取率的影响
在切段仙草 100 g, 微波功率 390 W, 微波间歇时间 60 s、热风干燥温度 65 ℃ 条件下, 考查转换点含水率 30%、40%、50%、60%、70% 对仙草多糖提取率的影响。

1.2.2.4 热风干燥温度对仙草多糖提取率的影响
在切段仙草 100 g, 微波功率 390 W, 微波间歇时间 60 s、转换点含水率 40% 条件下, 考查热风干燥温度 45、55、65、75、85 ℃ 对仙草多糖提取率的影响。

1.2.3 响应面优化试验设计 在单因素实验结果的基础上, 根据 Box-Benhke 试验设计原理, 选取微波功率(A)、微波间歇时间(B)、转换点含水率(C)、热风干燥温度(D)为自变量, 以仙草多糖提取率(Y)作为试验设计的响应值, 响应面试验设计的因素及水平如表 1 所示。

表 1 响应面试验设计的因素水平
Table 1 Factor and level of response surface test design

水平	A微波功率 (W)	B微波间歇时间 (s)	C转换点含水率 (%)	D热风干燥温度 (℃)
-1	357.5	50	30	70
0	390	60	40	75
1	422.5	70	50	80

1.2.4 含水率和多糖含量的测定

1.2.4.1 湿基含水率的测定 湿基含水率, 按公式(1)计算:

$$W_d(\%) = \frac{m_t - m_g}{m_t} \times 100$$
式 (1)

式中: W_d 为仙草干燥至 t 时刻湿基含水率, %; m_t 为仙草干燥至 t 时刻的总质量, g; m_g 为仙草绝干物质质量, g。

1.2.4.2 转换点含水率的测定 转换点含水率计算公式^[15] 如下:

$$W_t(\%) = \frac{m_t - m_0 (1 - W_0)}{m_t} \times 100$$
式 (2)

式中: W_t 为仙草干燥至 t 时刻湿基转换点含水率, %; m_0 为仙草干燥前的总质量, g; W_0 为仙草湿基初始含水率, %; m_t 为仙草干燥至 t 时刻的总质量, g。

1.2.4.3 仙草多糖提取 仙草多糖提取采用微波辅助碱提法^[16], 将干燥后的仙草粉碎至 80~100 目, 取 5 g, 按料液比 1:35 加入 0.0125 mol/L 碱液, 在微波功率 420 W 下处理 90 s, 取出并移入 90 ℃ 水浴锅内水浴浸提 1 h, 用 100 目滤布合并浸提液, 4000 r/min 离心 10 min 后取上清液, 真空抽滤去除杂质; 将滤液浓缩至约 10 mL, 加入 95% 乙醇, 滤液与乙醇比例

为 1:3, 进行 4000 r/min 离心 10 min, 取沉淀物, 经无水乙醇洗涤, 将沉淀干燥脱水得到多糖样品。

1.2.4.4 多糖测定方法 参考文献^[17] 的方法, 取 1 mL 多糖提取液稀释 15 倍, 取 1 mL 稀释液加入 5% 苯酚 1 mL 和浓硫酸 5 mL, 摇匀, 静置 30 min, 振荡, 置入 30 ℃ 水浴 20 min, 以蒸馏水作为空白, 在 490 nm 波长处测其吸光度, 将吸光度代入葡萄糖标准曲线回归方程并计算样品多糖含量。葡萄糖标准曲线的绘制参照中华人民共和国出入境检验检疫行业标准 SN/T 4260-2015, 葡萄糖标准曲线回归方程为 $y = 9.1171x + 0.0448$, $R^2 = 0.9985$ 。

仙草多糖提取按公式(3)计算:

$$\text{多糖提取率}(\%) = \frac{c \times v \times n}{m} \times 100$$
式 (3)

式中: c 为样品溶液中葡萄糖浓度, $\mu\text{g/mL}$; n 为样品溶液稀释倍数; v 为测定溶液体积, mL; m 为仙草粉质量, g。

1.2.5 不同干燥方式对仙草多糖提取率及凝胶品质的影响 开展仙草热泵干燥、晾晒干燥实验, 测试并比较不同干燥方式处理仙草干的干燥时间、多糖提取率及凝胶品质。

1.2.5.1 不同干燥方式处理 热泵干燥: 在恒定风速、湿度 27%, 干燥温度为 65 ℃, 切段仙草平铺密度为 0.42 g/cm² 条件下进行干燥, 干燥至干后含水率约 $\leq 13\%$ 停止, 并记录干燥时间。

晾晒干燥: 将切段仙草平铺在物料盘内并置于阳光底下晾晒, 晾晒过程中进行翻动, 提高干燥效率, 干燥至仙草干后含水率约 $\leq 13\%$ 停止, 并记录干燥时间。

1.2.5.2 仙草凝胶制备 参考文献^[18] 的方法, 取 60 g 干燥后的仙草放入水中浸泡, 将清洗干净的仙草放入锅中, 加入 2500 g 的清水和 3 g 食用碱, 开大火煮沸后转小火慢煮, 煮至仙草汁液呈现黑褐色、质地顺滑关火; 将汁液用 100 目纱布进行过滤, 取仙草滤液倒入锅中, 开中火, 加入调配好的木薯淀粉液(木薯淀粉 30 g 与水 100 g 调配), 搅拌均匀, 改小火加热至仙草淀粉混合料煮沸, 关火, 倒入密封容器, 放置冷却, 凝固成型得到黑色仙草凝胶。

1.2.5.3 仙草凝胶质构的测定 用物性测定仪对仙草凝胶进行硬度、粘性、弹性、内聚性、胶粘性、咀嚼性、回复性等指标测定。将制备好的仙草凝胶放置冰箱冷却 1 h 左右取出, 恢复至室温, 将其分割成长、宽、高均为 10 mm 的正方体样品, 对其进行质构测试, 采用 TPA 模式, 使用 P/36R 探头进行测定, 测定参数如下: 测前速率 5 mm/s、测试速率 1 mm/s、测后速率 1 mm/s、压缩程度 50%、停留时间 5 s、触发值 5 g, 整个操作过程在室温 25 ℃ 进行^[19]。

1.2.5.4 仙草凝胶的感官评价 参考文献^[20] 的方法, 分别对仙草凝胶样品各指标评分, 感官评分包括

色泽、质地、口感、风味四项指标。随机抽取 20 名食品专业人员组成品鉴小组,评分标准见表 2,对仙草凝胶样品四项指标进行综合评分,将同组实验各指标得分相加得出总得分,总分以百分制计。

表 2 感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria

项目	特征描述	分数
色泽(15分)	呈均匀棕褐色至黑褐色,无肉眼可见外来异物	11~15
	颜色较浅,无明显异物	6~10
	色泽不均一,有异物	0~5
质地(15分)	成型性好,少气泡,弹性好,无水析出	11~15
	成型性一般,有气泡,弹性一般,少量水析出	6~10
	成型性差,糊状,气泡多,弹性差,析水较多	0~5
口感(40分)	口感爽滑,细腻,无颗粒感富有弹性	31~40
	口感爽滑,细腻,弹性一般,较软糯	21~30
	口感一般,有颗粒感,弹性较差	11~20
	口感粗糙,颗粒感明显,无弹性	0~10
风味(30分)	仙草清香风味浓,无苦味,无涩感	20~30
	仙草清香风味浓,稍有苦味,无涩感	13~19
	仙草清香风味浅,有苦味或异味,稍有涩感	7~12
	无仙草清香,苦味或异味重,涩感重	0~6

1.3 数据处理

采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面设计和数据分析,使用 Origin 2019 和 SPSS26.0 软件对数据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 微波功率对仙草多糖提取率的影响 由图 1 可知,在恒定微波间歇时间、转换点含水率、热风干燥温度下,当微波功率由 195 W 升高到 390 W 的过程中,仙草多糖提取率持续升高,与微波功率呈正比,当微波功率升高至 390 W,仙草多糖提取率达到最高(12.85%),当微波功率大于 390 W 后,仙草多糖提取率有所降低。原因可能是随着微波功率增大温度升高,物料含水量下降速度提高,干燥到一定的转换点含水率时所需微波时间减少,对多糖提取率的损失减少,仙草多糖提取率上升^[21]。而当微波功率增大到

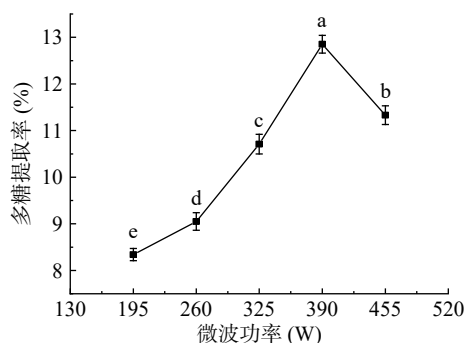


图 1 微波功率对多糖提取率的影响

Fig.1 Effect of microwave power on extraction rate of polysaccharide

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);图 2~图 4 同。

一定程度时(>390 W),仙草多糖提取率开始下降,功率过大对仙草脱水作用较为强烈,随着微波功率过大,温度迅速升高,水分散失速度过快,而容易出现干燥过热,产生焦糊现象^[22],而造成多糖被破坏程度加大,严重影响了仙草多糖及干制品品质。因此,选用微波功率 357.5、390、422.5 W 进行响应面优化试验为宜。

2.1.2 微波间歇时间对仙草多糖提取率的影响 微波干燥根据工作方式可分为连续加热和间歇加热两种方式,在微波连续加热方式下物料内部温度急剧上升,容易造成其局部过热而烧焦,间歇加热方式为样品中的水分重新分配提供一定的时间,能避免连续加热造成局部烧伤,从而影响产品品质。因此,微波干燥仙草时采用微波间歇方式,可有效防止仙草烧焦,充分脱除内部水分,降低能耗。

由图 2 可知,在恒定微波功率、转换点含水率、热风干燥温度下,仙草多糖提取率随着微波间歇时间的增加呈先上升后下降的趋势,到 60 s 时仙草多糖提取率最高,12.82%,当微波间歇时间大于 60 s,仙草多糖提取率呈下降趋势。微波间歇时间增加,间歇过程中仙草通过微波余热脱除内部水分,微波加热时间减少,对多糖提取率的破坏性相应减小,从而仙草多糖提取率上升。而微波间歇时间增加到一定程度时(>60 s),仙草多糖提取率开始下降,原因是间歇时间过长,物料只能依靠残留的少量余热进行干燥^[23],在达到一定的转换点含水率范围内,间歇时间过长,不利于水分及时蒸发,仙草失水较慢,微波干燥总时间增加,导致多糖的破坏程度增大,仙草多糖提取率降低。因此,选用微波间歇时间 50、60、70 s 进行响应面优化试验为宜。

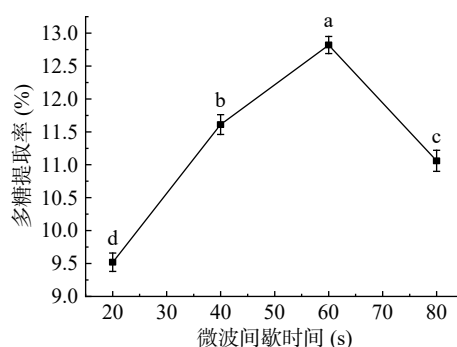


图 2 微波间歇时间对多糖提取率的影响

Fig.2 Effect of microwave intermittent time on extraction rate of polysaccharide

2.1.3 转换点含水率对仙草多糖提取率的影响 由图 3 可知,在恒定微波功率、微波间歇时间、热风干燥温度下,仙草多糖提取率随着转换点含水率的增加呈先上升后下降的趋势,到 40% 时仙草多糖提取率最高(12.95%),当转换点含水率大于 40%,仙草多糖提取率呈下降趋势。当联合干燥转换点含水率 $<40\%$ 时,转换点含水率过小,联合干燥前期的微波干燥时间会增加,微波干燥过程中产生高温对糖类物

质破坏程度也会有所增加, 导致仙草多糖提取率下降; 当联合干燥转换点含水率>40% 时, 转换点含水率较大, 联合干燥前期的微波干燥时间较短, 后期热风干燥时间及总干燥时间将增加, 样品中仙草糖类物质被破坏程度加大^[24], 对仙草多糖提取率及干制品品质造成严重影响。因此, 选用转换点含水率 30%、40%、50% 进行响应面优化试验为宜。

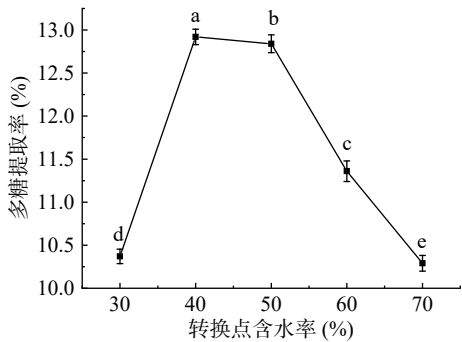


图 3 转换点含水率对多糖提取率的影响
Fig.3 Effect of water content at conversion point on extraction rate of polysaccharide

2.1.4 热风干燥温度对仙草多糖提取率的影响 由图 4 可知, 在恒定微波功率、微波间歇时间、转换点含水率下, 仙草多糖提取率随着热风干燥温度的升高呈先上升后下降的趋势, 到 75 ℃ 时仙草多糖提取率最高(13.11%), 当热风干燥温度大于 75 ℃ 后仙草多糖提取率反而降低。随热风干燥温度的升高, 传热速率加快, 水分子热运动加快, 加速物料内部的水分迁移^[25], 缩短热风干燥时间, 减少干燥过程中多糖损失, 提高仙草多糖提取率。当热风干燥温度>75 ℃ 时, 仙草多糖提取率开始下降, 原因是热风干燥温度过高, 水分迅速蒸发, 仙草组织结构收缩和多糖结构所受到的破坏程度较大, 导致多糖损失较多, 仙草多糖提取率下降, 本研究结果与热风烘干铁皮石斛茎提取多糖的试验结果相类似^[26]。因此, 选用热风干燥温度 70、75、80 ℃ 进行响应面优化试验为宜。

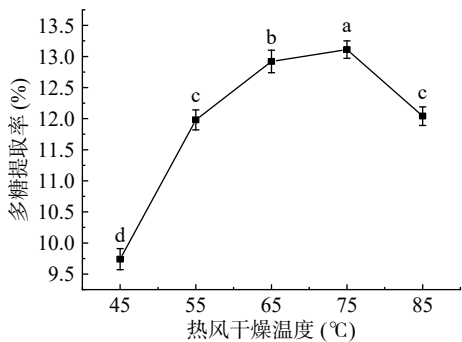


图 4 热风干燥温度对多糖提取率的影响
Fig.4 Effect of hot air drying temperature on extraction rate of polysaccharide

2.2 响应面试验结果

2.2.1 响应面实验设计和结果 在单因素实验的基础上, 以微波功率(A)、微波间歇时间(B)、转换点含

水率(C)、热风干燥温度(D)为自变量, 以仙草多糖提取率(Y)作为试验设计的响应值, 根据 Box-Benhke 试验设计原理, 对仙草微波间歇-热风联合干燥法进行四因素三水平工艺优化试验, 响应面试验设计及结果见表 3。

表 3 响应面试验设计与结果
Table 3 Design and results of response surface test

试验号	因素				Y 多糖提取率 (%)
	A微波功率	B微波间歇时间	C转换点含水率	D热风干燥温度	
1	-1	-1	0	0	7.93
2	1	-1	0	0	12.02
3	-1	1	0	0	8.42
4	1	1	0	0	10.98
5	0	0	-1	-1	9.85
6	0	0	1	-1	10.94
7	0	0	-1	1	8.01
8	0	0	1	1	10.49
9	-1	0	0	-1	8.09
10	1	0	0	-1	11.85
11	-1	0	0	1	6.08
12	1	0	0	1	10.07
13	0	-1	-1	0	9.95
14	0	1	-1	0	10.16
15	0	-1	1	0	10.99
16	0	1	1	0	12.11
17	-1	0	-1	0	7.36
18	1	0	-1	0	11.06
19	-1	0	1	0	8.92
20	1	0	1	0	12.11
21	0	-1	0	-1	11.04
22	0	1	0	-1	11.88
23	0	-1	0	1	8.41
24	0	1	0	1	10.41
25	0	0	0	0	13.40
26	0	0	0	0	12.98
27	0	0	0	0	13.09
28	0	0	0	0	13.53
29	0	0	0	0	12.97

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对优化试验数据进行多元回归拟合, 获得微波功率、微波间歇时间、转换点含水率及热风干燥温度对仙草多糖提取率的二次多项式回归模型, 对模型进行方差分析得二次多项式回归方程为: $Y=13.19+1.77A+0.30B+0.76C-0.85D-0.38AB-0.13AC+0.058AD+0.23BC+0.29BD+0.35CD-2.20A^2-1.02B^2-1.32C^2-1.92D^2$ 。

从二次多项式回归方程可以看出, 方程中二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 和 D^2 系数都为负数, 说明二次多项式回归方程存在稳定点、即存在极大值^[27]。

由表 4 方差分析可知, 回归模型 $P<0.0001$, 在 $\alpha=0.01$ 水平下为极显著, 失拟项 $P=0.0962$, 在 $\alpha=0.01$ 或 0.05 水平下不显著, 表明该模型不失拟, 决定系数 $R^2=0.9735$, $R_{Adj}^2=0.9470$, 说明该模型的拟合程度良好, 因此能够对微波间歇-热风联合干燥法所设置的不同参数下对于仙草多糖提取率进行准确的预测。

表 4 回归方程方差分析表

Table 4 Variance analysis table of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	106.37	14	7.60	36.74	<0.0001	**
A	37.77	1	37.77	182.67	<0.0001	**
B	1.09	1	1.09	5.28	0.0375	*
C	7.01	1	7.01	33.89	<0.0001	**
D	8.64	1	8.64	41.76	<0.0001	**
AB	0.59	1	0.59	2.83	0.1147	
AC	0.065	1	0.065	0.31	0.5838	
AD	0.013	1	0.013	0.064	0.8040	
BC	0.21	1	0.21	1.00	0.3340	
BD	0.34	1	0.34	1.63	0.2229	
CD	0.48	1	0.48	2.34	0.1487	
A ²	31.38	1	31.38	151.76	<0.0001	**
B ²	6.79	1	6.79	32.84	<0.0001	**
C ²	11.25	1	11.25	54.41	<0.0001	**
D ²	23.93	1	23.93	115.73	<0.0001	**
残差	2.89	14	0.21			
失拟项	2.63	10	0.26	4.02	0.0962	
净误差	0.26	4	0.066			
总误差	109.26	28				

$$R^2_{Adj}=0.9470 \quad R^2=0.9735$$

注: *代表差异显著, $P<0.05$; **代表差异极显著, $P<0.01$ 。

由回归模型一次项方差分析中可知,微波功率、转换点含水率、热风干燥温度对仙草多糖提取率影响极显著($P<0.01$),微波间歇时间对仙草多糖提取率影响显著($P<0.05$)。由回归模型二次项方差分析中可知,微波功率、微波间歇时间、转换点含水率、热风干燥温度对仙草多糖提取率影响极显著($P<0.01$)。由回归模型交互项方差分析中可知,四个因素之间的交互作用对仙草多糖提取率影响不显著($P>0.05$)。根据 F 值可知影响仙草微波间歇-热风联合干燥因素大小顺序为:微波功率>热风干燥温度>转换点含水率>微波间歇时间。

2.2.2 响应面曲线分析 仙草微波间歇-热风联合干燥工艺条件中 4 个因素在反应过程中的交互作用如图 5~图 10。响应曲面的曲线走势越陡峭,说明两个因素相互作用影响越显著,响应曲面的曲线走势越平坦,则说明两个因素的相互作用影响较小,等高线为椭圆形表示两个因素交互作用显著,等高线为圆形则说明交互作用不显著^[28],由图 5~图 10 可知,4 个因素间无明显交互作用。

2.2.3 验证实验 由软件模型对试验数据进行分析处理,得出微波间歇-热风联合干燥仙草工艺的最佳条件为:微波功率 403.52 W,微波间歇时间为 60.87 s,转换点含水率为 42.88%,热风干燥温度为 74.00 ℃。模型预测的最大总糖含量为 13.44%。结合实际操作进行修正得到最佳工艺条件为微波功率 403 W,微波间歇时间为 60 s,转换点含水率为 42%,热风干燥温度为 74 ℃。在此条件下进行验证试验,仙草多糖提取率平均值为 13.60%,接近模型理论最大值 13.44%,说明实验重现性良好,此最佳模型较可靠。

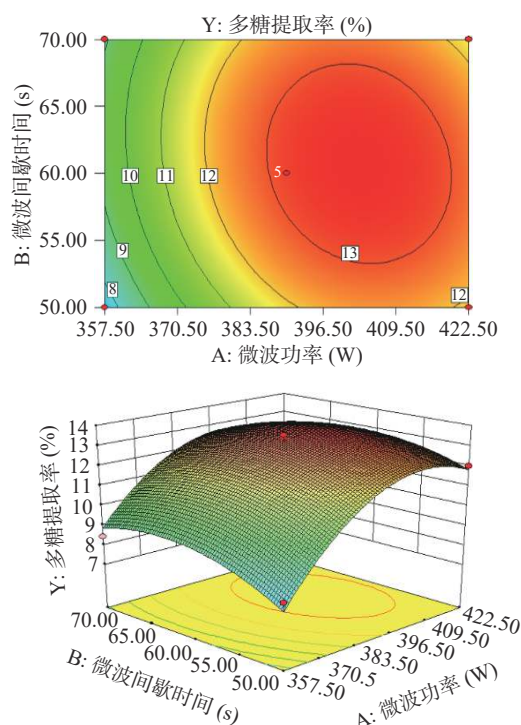


图 5 微波功率与微波间歇时间交互作用的等高线和响应曲面

Fig.5 Contour and response surface of interaction between microwave power and microwave intermittency

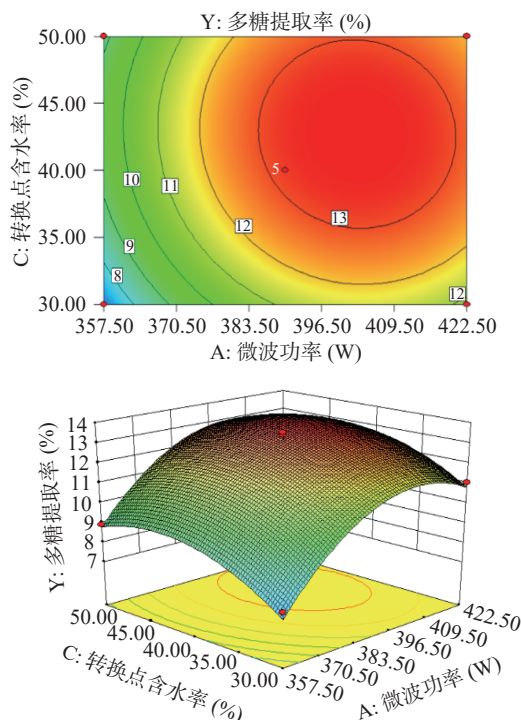


图 6 微波功率与转换点含水率交互作用的等高线和响应曲面

Fig.6 Contour and response surface of interaction between microwave power and moisture content at conversion point

2.3 不同干燥方式处理仙草对多糖提取及凝胶品质的影响

2.3.1 不同干燥方式处理仙草对多糖提取率的影响 由表 5 可知,经过三种不同干燥方式处理仙草,微

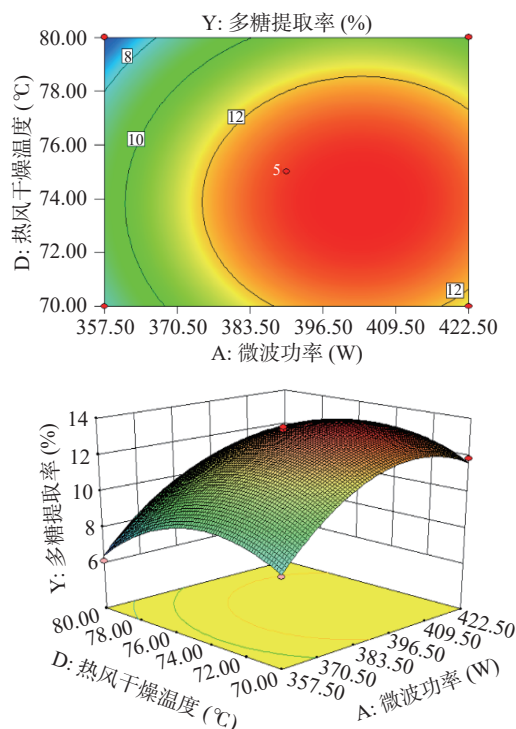


图 7 微波功率与热风干燥温度交互作用的等高线和响应曲面

Fig.7 Contour and response surface of microwave power interacting with hot air drying temperature

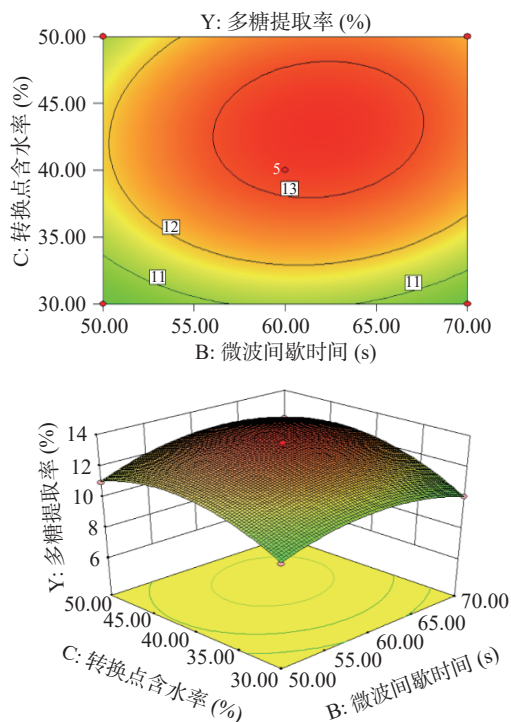


图 8 微波间歇时间与转换点含水率交互作用的等高线和响应曲面

Fig.8 Contour line and response surface of the interaction between microwave intermittency and moisture content at the transition point

波间歇-热风联合干燥与热泵干燥、晾晒干燥相比较,前者干燥方式处理后仙草干所提取多糖提取率较高,为 $(13.60\% \pm 0.11\%)$,而干燥时间为 (42 ± 1.00) min,仅是后两种干燥方式的 1.44%~16.67%,干燥效率较高。

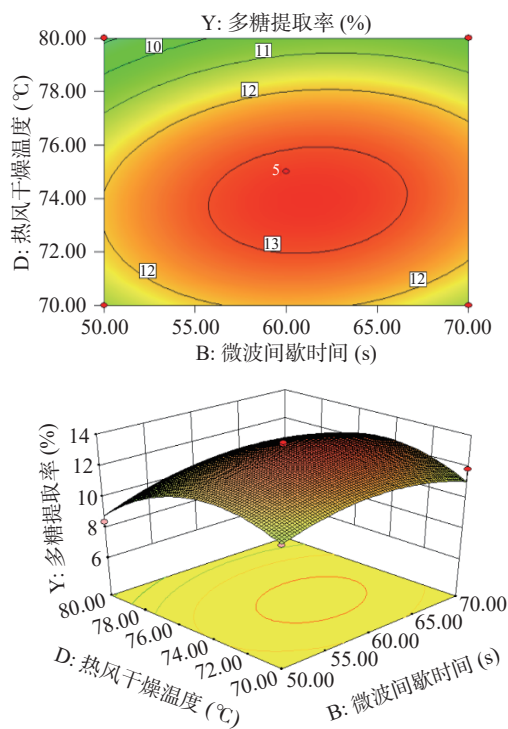


图 9 微波间歇时间与热风干燥温度交互作用的等高线和响应曲面

Fig.9 Contour line and response surface of interaction of microwave intermittent time and hot air drying temperature

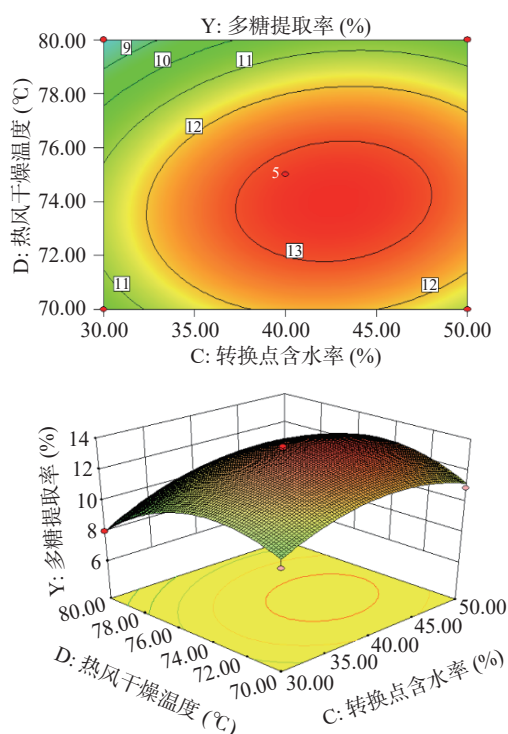


图 10 转换点含水率与热风干燥温度交互作用的等高线和响应曲面

Fig.10 Contour and response surface of the interaction between moisture content at transition point and hot air drying temperature

2.3.2 不同干燥方式处理仙草对仙草凝胶品质特性的影响 仙草凝胶体的硬度、粘性、弹性、内聚性、胶黏性、咀嚼性、回复性等质构特性是评价仙草产品

表5 不同干燥方式处理仙草的干燥时间及多糖提取率

Table 5 Drying time and polysaccharide extraction rate of *Mesona blumes* treated with different drying methods

主要特性	热泵干燥	微波间歇-热风联合干燥	晾晒干燥
干燥时间(min)	270.00±3.61 ^b	42.00±1.00 ^c	2880.00±18.03 ^a
多糖提取率(%)	12.36±0.10 ^b	13.60±0.11 ^a	12.78±0.19 ^{ab}

注:同行不同小写字母表示差异显著 $P<0.05$,表6同。

品质的重要指标。由表6可知,微波间歇-热风联合干燥处理相所制作的凝胶样品硬度(516.60±8.54)g、弹性为(0.83±0.01)和回复性(0.33±0.01)均较为适中,凝胶体内聚性(0.48±0.01)稍小,胶粘性(359.68±11.56)g和咀嚼性(285.54±13.21)g较高,原因是微波间歇-热风联合干燥处理时间短,仙草多糖破结构坏少,从而使凝胶体不易破碎,口感更Q弹顺滑。

表6 不同干燥方式处理仙草的凝胶体质构特性

Table 6 Texture gel characteristics of *Mesona blumes* treated with different drying methods

主要指标	热泵干燥	微波间歇-热风联合干燥	晾晒干燥
硬度(g)	373.25±6.87 ^c	516.60±8.54 ^b	637.08±8.12 ^a
弹性	0.86±0.023 ^a	0.83±0.01 ^{ab}	0.81±0.01 ^b
内聚性	0.680±0.006 ^a	0.480±0.010 ^c	0.510±0.002 ^b
胶粘性(g)	253.48±3.74 ^c	359.68±11.56 ^a	324.28±2.36 ^b
咀嚼性(g)	231.51±1.37 ^b	285.54±13.21 ^a	270.57±4.36 ^a
回复性	0.370±0.020 ^a	0.330±0.010 ^b	0.250±0.004 ^c

2.3.3 不同干燥方式处理仙草对仙草凝胶感官评价的影响 由图11可知,以三种不同干燥处理的仙草所提取的仙草多糖制成的凝胶样品色泽、质地、口感、风味、感官总分的影响不显著($P>0.05$),微波间歇-热风联合干燥、晾晒干燥和热泵干燥处理的仙草所制成凝胶体感官总分分别是83.2、79.8、80.5分,微波间歇-热风联合干燥处理的仙草所制成的凝胶样品评分最高,原因可能是仙草干燥时间非常短,仙草的营养成分和固有风味保持得比较完整,所制成的凝胶样品具有更浓郁的仙草香气,胶体更富有弹性,口感较佳,所以感官评分较高。

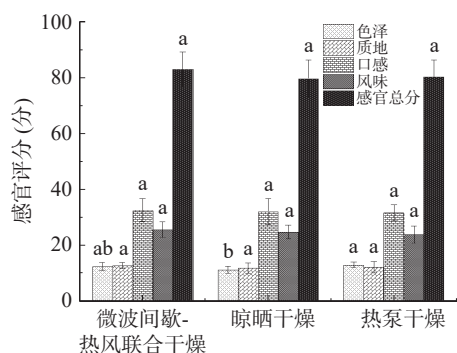


图11 不同干燥方式处理仙草对多糖凝胶体感官评分影响
Fig.11 Effect of different drying methods on sensory evaluation of curcuma polysaccharide gel

3 结论

本文以仙草为原料,在单因素实验基础上,通过

响应面分析法对仙草微波间歇-热风联合干燥工艺参数进行优化,得到最佳工艺参数:微波功率403 W,微波间歇时间为60 s,转换点含水率为42%,热风干燥温度为74℃,此条件下仙草多糖提取率为13.60%。通过微波间歇-热风联合干燥、热泵干燥、晾晒干燥处理仙草进行仙草多糖提取率和凝胶品质比较,结果表明微波间歇-热风联合干燥仙草仙草多糖提取率较高,且所制成凝胶样品的质构特性和感官评分较优。本研究为仙草加工工业及仙草总糖提取生产应用提供理论依据与技术支持。

参考文献

- [1] YOU Gang, LIU Xiaoling, ZHAO Mouming. Preparation and characterization of hsian-tsao gum and chitosan complex coacervates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 255-266.
- [2] 林丽华, 黄莉鑫, 谢建华. 凉粉草功能活性成分及其生物活性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(20): 356-359. [LIN Lihua, HUANG Lixin, XIE Jianhua. Review on main chemical constituents and biological activities of *Mesona chinensis*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(20): 356-359.]
- [3] 肖月欢. 不同凉粉草多糖对木薯淀粉凝胶特性的影响及新型凉粉草冰糕制品研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [XIAO Yuehuan. Effects of different *Mesona chinensis* polysaccharides on gelation properties of tapioca starch and the development of new *Mesona chinensis* sorbet[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]
- [4] 何传波, 邓婷, 魏好程, 等. 仙草多糖对细胞氧化损伤的保护作用[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 160-168. [HE Chuanbo, DENG Ting, WEI Haocheng, et al. Protective effect of polysaccharide from *Mesona blumes* on oxidative damage of cells[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 160-168.]
- [5] 栗俊广, 吴萌萌, 李爽, 等. 仙草胶成分分析及抑制猪油氧化能力的研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(9): 205-208. [LI Junguang, WU Mengmeng, LI Shuang, et al. Study on the monosaccharide compositions and anti-oxidation activity of hsian-tsao gum for lard[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(9): 205-208.]
- [6] 王迪, 李大靖, 江宁, 等. 不同干燥方式对黄秋葵脆条品质及能耗的影响[J]. *食品工业科技*, 2017(1): 101-105. [WANG Di, LI Dajing, JIANG Ning, et al. Effect of drying methods on quality and energy consumption of okra crisp bar[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017(1): 101-105.]
- [7] BAKHARA C K, PAL U S, BAL L M. Drying characteristic and physico-chemical evaluation of tender jackfruit slices during osmo-convective drying[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017.
- [8] SZADZIŃSKA J, MIERZWA D. Intermittent-microwave and convective drying of parsley[C]// 21st International Drying Symposium(IDS). Valencia: Drying Technology, 2018: 261.1455-1462.
- [9] TALENS C, CASTRO-GIRALDEZ M, FITO P J. Effect of microwave power coupled with hot air drying on sorption isotherms and microstructure of orange peel[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2018, 11(4): 723-734.
- [10] DAS I, ARORA A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 223(APR.): 208-219.

- [11] 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: 1-9.
- [12] POLITOWICZ J, LECH K, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ L, et al. Volatile composition and sensory profile of *Cantharellus cibarius* Fr. as affected by drying method[J]. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(15): 5223-5232.
- [13] 于海明, 金中波, 张雪峰, 等. 微波联合热风干燥方式对松茸干燥品质影响研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(1): 78-84, 94. [YU Haiming, JIN Zhongbo, ZHANG Xuefeng, et al. Research of the effect of microwave combined with hot air drying method on drying quality of tricholoma matsutake[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 78-84, 94.]
- [14] 马超, 张建昌, 李新胜, 等. 不同干燥工艺对苹果粉品质的影响研究[J]. *中国果菜*, 2015 (8): 15-19. [MA Chao, ZHANG Jianchang, LI Xinsheng, et al. Influence of different drying methods on quality of apple powder [J]. *China Fruit & Vegetable* 2015 (8): 15-19.]
- [15] 徐艳阳, 蔡森森, 吴海成, 等. 玉米热风与微波联合干燥品质的研究[J]. *食品研究与开发*, 2012(9): 18-20. [XU Yanyang, CAI Sensen, WU Haicheng, et al. Studies on drying quality of maize dehydrated by a combination of hot-air and microwave drying[J]. *Food Research and Development*, 2012(9): 18-20.]
- [16] 蒋文明, 李爱军, 汪辉, 等. 微波辅助碱液提取仙草多糖[J]. *食品科学*, 2011, 32(4): 11-14. [JIANG Wenming, LI Aijun, WANG Hui, et al. Microwave-assisted alkali extraction of *Mesona blumes* polysaccharides[J]. *Food Science*, 2011, 32(4): 11-14.]
- [17] 黄丽媛, 邓婷, 何传波, 等. 仙草多糖提取工艺的优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(8): 2907-2913. [HUANG Liyuan, DENG Ting, HE Chuanbo, et al. Optimization of extraction process for polysaccharide from *Mesona*[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(8): 2907-2913.]
- [18] 王海华. 凉粉草成分功效及提取方法的研究进展[J]. *中国药房*, 2014, 25(27): 2584-2587. [WANG Haihua. Research progress of ingredients efficacy and extraction methods of *Potentilla odoratum*[J]. *China Pharmacy*, 2014, 25(27): 2584-2587.]
- [19] 陈梓锐. 超高压对多糖凝胶的性能影响及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. [CHEN Zikai. Ultra high pressure effect on the performance of polysaccharide gel and application research [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.]
- [20] 黄锦琪, 江联, 温笑, 等. 红薯黑凉粉的配方优化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 133-139. [HUANG Jinqi, JIANG Lian, WEN Xiao, et al. Optimization of formula of sweet potato black Chinese jelly[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 133-139.]
- [21] 杨大伟, 申丹, 钟果林. 微波和热风联合干燥魔芋片的最佳工艺方法研究[J]. *包装与食品机械*, 2020, 38(3): 18-21, 50. [YANG Dawei, SHEN Dan, ZHONG Guolin. Study on the optimal process parameters of drying konjac chips by microwave combined with hot air[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2020, 38(3): 18-21, 50.]
- [22] 岑顺友, 刘晓燕, 任飞, 等. 微波联合热风干燥生姜片工艺优化[J]. *中国调味品*, 2020, 45(1): 99-104. [CEN Shunyou, LIU Xiaoyan, REN Fei, et al. Optimization of microwave and hot air drying process of ginger slices [J]. *China Condiment* 2020, 45(1): 99-104.]
- [23] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 195-201. [PAN Yuyan, DUAN Zhenhua, LIU Yan, et al. Research on properties and kinetic model of intermittent microwave drying to pitaya slices[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(3): 195-201.]
- [24] 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(14): 214-221. [ZHANG Hui, ZHANG Yuren, YANG Jia, et al. Optimization of hot air-microwave combined drying process of shiitakes by response surface method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019(14): 214-221.]
- [25] 金建龙, 苑亚, 董建, 等. 八角热风干燥水分变化及品质分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 79-85. [JIN Jianlong, YUAN Ya, DONG Jian, et al. Moisture transformation and quality analysis of star anise during hot air drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 79-85.]
- [26] 王丽霞, 刘孟宗, 王芳, 等. 铁皮石斛多糖提取及抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2019, 30(2): 58-63. [WANG Lixia, LIU Mengzong, WANG Fang, et al. Study on extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Dendrobium candidum*[J]. *China Food Additives*, 2019, 30(2): 58-63.]
- [27] 董红艳, 张守文. 薏米蛋白的酶水解工艺优化[J]. *农产品加工 (学刊)*, 2013(5): 46-50. [DONG Hongyan, ZHANG Shouwen. process optimization for enzymatic hydrolysis condition to coix seed protein by protease[J]. *The Processing of Agricultural Products*, 2013(5): 46-50.]
- [28] 唐小闲, 邱培生, 段振华, 等. 响应面法优化超声-微波辅助提取莲藕膳食纤维工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 132-139. [TANG Xiaoxian, QIU Peisheng, DUAN Zhenhua, et al. Optimization of ultrasonic-microwave assisted extraction of dietary fiber from lotus root by response surface methodology[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 132-139.]