

真空联合倾斜式热风干燥茯苓丁的响应面试验及多目标优化

巨浩羽¹, 郑志安^{2*}, 赵士豪¹, 赵海燕³, 张卫鹏⁴, 高振江², 肖红伟²

1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061

2. 中国农业大学工学院, 北京 100083

3. 河北经贸大学工商管理学院, 河北 石家庄 050061

4. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048

摘要:目的 探索茯苓丁真空干燥+倾斜式热风联合干燥过程中, 真空温度、切换水分比、热风温度及其交互作用对干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的影响, 以期得到干燥时间短、品质好、能耗低的茯苓丁干燥工艺参数。方法 以茯苓丁为原料, 当真空干燥到某一含水率时再进行倾斜式热风干燥; 选取真空干燥温度(x_1 , 65~85 °C)、切换水分比(x_2 , 70%~90%)、热风干燥温度(x_3 , 65~85 °C)为因素, 设计 Box-Behnken 响应面试验, 分析影响各指标的主次因素及各因素间的交互作用, 建立干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的二次回归模型。构建适应度函数, 分别用综合评分法、遗传算法、NSGA-II 法进行优化, 通过比较 3 种优化方法的结果, 得到最佳工艺参数并加以验证。结果 影响干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的主次排序为 $x_2 > x_3 > x_1$ 、 $x_2 > x_1 > x_3$ 、 $x_3 > x_2 > x_1$ 、 $x_2 > x_3 > x_1$ 。建立的干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率回归模型具有统计学意义 ($P < 0.001$), 可用于对茯苓丁联合干燥评价指标的分析和预测。综合评分法优化结果为真空温度 65.12 °C、切换水分比 70.07%、热风温度 74.19 °C, 该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 330.4 min、4.13 kJ·h/kg、3.52 mg/g、4.48%; 遗传算法优化结果为: 真空温度 82.23 °C、切换水分比 81.10%、热风温度 69.04 °C, 该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 245.27 min、2.01 kJ·h/kg、3.32 mg/g、23.05%; NSGA-II 算法优化结果为真空温度 65.04 °C、切换水分比 70%、热风温度 70.96 °C, 该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 340.86 min、4.22 kJ·h/kg、3.87 mg/g、4.21%。以适应度为评价指标, 可得出 NSGA-II 算法优化结果最好。结论 NSGA-II 算法可用于茯苓丁真空干燥+倾斜式热风干燥工艺的多目标优化, 从 Pareto 集合中选取的较佳工艺参数并进行修正; 确定最佳条件为真空温度 65 °C、切换水分比 70%、热风温度 71 °C, 该工艺条件下的干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 (335 ± 13) min、 (4.28 ± 0.32) kJ·h/kg、 (3.82 ± 0.31) mg/g、 (4.33 ± 0.35) %。优化后的联合干燥工艺总体上具有干燥时间短、单位能耗低、多糖含量高、破碎率低等优点, 节能增效作用显著, 可为茯苓丁的工业化加工提供理论依据和技术支持。

关键词: 茯苓丁; 干燥; 真空干燥; 倾斜式热风干燥; 联合干燥; 单位能耗; 破碎率; 多糖; 多目标优化; 适应度函数

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2021)08-2294-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.08.012

Response surface design and multi-objective optimization of *Poria cocos* cubes drying by vacuum combined inclined hot air

JU Hao-yu¹, ZHENG Zhi-an², ZHAO Shi-hao¹, ZHAO Hai-yan³, ZHANG Wei-peng⁴, GAO Zhen-jiang², XIAO Hong-wei²

1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Business Administration, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China

4. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目 (CARS-21); 河北省自然科学基金资助项目 (C2020207004); 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2021054); 北京市自然科学基金项目 (6204035); 北京市教委组织部优秀人才项目 (2018000020124G034)

作者简介: 巨浩羽, 博士, 讲师, 研究方向为中药材干燥技术与装备。E-mail: ju56238@163.com

*通信作者: 郑志安, 男, 副教授, 博士, 研究方向为要从事农业机械工程、农业工程技术集成模式、中药材加工机械化等方面的研究。

E-mail: zhengza@cau.edu.cn

Abstract: Objective To investigate the vacuum temperature (x_1) switching moisture ratio (x_2), hot air temperature (x_3) and their interaction on drying time, unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate in the process of "vacuum drying + inclined hot air" combined drying of *Poria cocos*. Therefore, the drying process parameters of *P. cocos* with short drying time, good quality and low energy consumption were achieved. **Methods** Taking *P. cocos* cube as raw material, when the vacuum drying reaches a certain moisture content, the inclined hot air drying is carried out; The factors of vacuum drying temperature (65—85 °C), switching moisture ratio (70%—90%) and hot air drying temperature (65—85 °C) are selected to design Box-Behnken response surface test was used to analyze the primary and secondary factors influencing the indexes and the interaction among them. The quadratic regression model of drying time, unit energy, polysaccharide content and crushing rate were established. The fitness function was constructed and optimized by comprehensive scoring method, genetic algorithm and NSGA-II method respectively. By comparing the results of the three optimization methods, the optimal process parameters were obtained and verified. **Results** The order of influencing drying time, unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate was $x_2 > x_3 > x_1$, $x_2 > x_1 > x_3$, $x_3 > x_2 > x_1$, $x_2 > x_3 > x_1$. The regression model of drying time, energy consumption per unit, polysaccharide content and crushing rate was statistically significant ($P < 0.001$), which could be used to analyze and predict the evaluation index of *P. cocos* cube combined drying. The optimal process parameters were optimized by comprehensive scoring method as follows: vacuum temperature 65.12 °C, moisture ratio 70.07%, hot air temperature 74.19 °C. Under this circumstance, the drying time, unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate was 330.4 min, 4.13 kJ·h/kg, 3.52 mg/g and 4.48%, respectively. The process parameters optimized by genetic algorithm was as follows: vacuum temperature 82.23 °C, switching water ratio 81.10% and hot air temperature 69.04 °C. And the drying time, unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate was 245.27 min, 2.01 kJ·h/kg, 3.32 mg/g and 23.05%, respectively. NSGA-II algorithm optimized the optimal process parameters as follows: vacuum temperature 65.04 °C, switching moisture ratio 70%, hot air temperature 70.96 °C, under which the drying time, unit energy consumption, polysaccharide content, crushing rate were 340.86 min, 4.22 kJ·h/kg, 3.87 mg/g and 4.21%, respectively. Taking fitness value as the evaluation index, the NSGA-II algorithm optimization can be considered as the best result. **Conclusion** NSGA-II algorithm can be used for the multi-objective optimization of "vacuum drying + inclined hot air" drying process of *P. cocos* cubes, and the better process parameters selected from Pareto set are modified. The optimal conditions are determined as follows: vacuum temperature 65 °C, switching moisture ratio 70%, hot air temperature 71 °C. The drying time, unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate were (335 ± 13) min, (4.28 ± 0.32) kJ·h/kg, (3.82 ± 0.31) mg/g, (4.33 ± 0.35)%, respectively. The optimized combined drying process has the advantages of short drying time, low energy consumption per unit, high polysaccharide content, low crushing rate, and significant energy saving and synergistic effect, which can provide theoretical basis and technical support for the industrial processing of *P. cocos*.

Key words: *Poria cocos* cubes; drying; vacuum drying; inclined hot air drying; combined drying; unit energy consumption; crushing rate; polysaccharide; multi-objective optimization; fitness function

茯苓为多孔菌科茯苓属真菌茯苓 *Poria cocos* (Schw.) Wolf 的菌核, 常寄生于松树根部, 是传统常用中药材。其性味甘甜、平; 归心、肾、脾、肺经; 具有利水渗湿、健脾和胃、宁心安神的功效。茯苓的主要化学成分有茯苓多糖、茯苓酸等物质, 茯苓多糖具有明显的抗肿瘤作用, 茯苓酸有助于睡眠延长效应, 改善睡眠的作用^[1-3]。

干燥是茯苓加工的重要环节,《中国药典》2020年版规定, 茯苓药材的含水率不得超过 18.0%, 浸出物不得少于 2.5%^[4]。目前茯苓的干燥方式有自然晾晒、热风干燥、气体射流冲击干燥、真空脉动干燥、中短波联合气体射流干燥方式等。许甜甜^[5]研究发现, 当热风干燥温度高于 60 °C 时, 茯苓多糖含量有降低趋势, 40~60 °C 干燥时, 茯苓药效较好,

但干燥时间较长。张卫鹏等^[4,6]对比研究了自然晾晒、热风干燥、气体射流干燥、中短波联合气体射流冲击和真空脉动干燥条件下茯苓的干燥特性和品质, 结果表明, 真空脉动与自然晾晒破碎率明显偏低, 而气体射流干燥茯苓丁破碎率最高, 约大于 60%; 中短波红外联合气体射流的茯苓丁破碎率比气体射流干燥技术低约 18%。自然晾晒干燥方式所需时间长, 且易发霉变色, 且熏硫处理容易使其物料变性失效; 热风干燥易造成茯苓丁内外温度、水分分布不均, 导致茯苓丁的“破裂”, 降低商品属性; 气体射流冲击干燥技术, 对流换热系数高、干燥速度快, 但表面易结壳, 喷嘴与物料相对位置固定, 有装载量小、干燥不均的缺陷。因此, 探讨合适的茯苓丁干燥技术, 解决干燥过程中存在的干燥时间

长和干燥品质变差的问题具有重要意义。

Zhang 等^[7]和 Jaramillo 等^[8]基于 Bigot's 体积收缩模型研究发现, 真空干燥茯苓丁形态完整。当含水率降至某一值时, 体积形态会稳定不变, 此时增加干燥强度, 或采用联合干燥技术, 会提高干燥效率, 同时也不会显著增加茯苓丁破碎率。真空干燥技术是利用低压水沸点较低的特性, 加速物料脱水, 在中药材加工领域应用广泛。它可以隔绝氧气, 最大程度保护物料原有结构和形状, 兼顾外观和内在品质^[9-10]。此外, 热风干燥技术因其设备简单、成本低而广泛应用于中药的干燥加工中^[11-12]。相对于现有的热风干燥技术, 倾斜式热风干燥(本实验简称热风干燥)还具有装载量大、干燥均匀的优点, 已逐渐应用于果蔬干燥加工中^[13]。而关于茯苓的分段组合干燥技术的文献报道较少, 故本研究拟基于真空联合热风干燥技术, 以期提高茯苓的干燥效率和品质。

茯苓丁干燥加工涉及效率、能耗、品质等诸多指标, 一味追求高效或高品质并不可行。为优化真空联合热风干燥技术, 茯苓的干燥品质的评价涉及多目标寻优的过程。隶属度综合评分法、遗传算法、带精英策略的快速非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II 算法)皆为常用的多指标寻优方法^[14-17]。但有关茯苓丁多目标优化报道的文献较少, 尚未有可直接用于工业化生产的实验参数。因此, 为解决茯苓丁工业化加工技术手段匮乏、品质差的问题。本实验采用真空干燥技术联合倾斜式热风干燥技术, 系统探究真空温度、切换水分比、热风温度对干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的影响规律, 并对比隶属度综合评分法、遗传算法、NSGA-II 算法的多目标寻优结果。综合评价法 3 种多目标优化方法效果的基础上, 确定最佳工艺参数。以期获得效率、能耗、品质俱佳的工艺参数, 为茯苓工业化加工提供理论参考和技术依据。

1 仪器与材料

1.1 原料获取

新鲜茯苓采摘于安徽金寨, 经中国农业大学工学院郑志安副教授鉴定为茯苓 *P. cocos* (Schw.) Wolf。茯苓采收后置于温度为 $(24 \pm 3)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $(95 \pm 4)\%$ 的环境中, 发汗 3 d 后。如图 1 所示, 人工一次去皮, 剥除茯苓黑褐表皮; 二次去皮剥除赤茯苓。再采用切丁机(岳西县岳工机械厂)先切



1-新鲜茯苓 2-一次去皮 3-二次去皮 4-茯苓片 5-茯苓丁
1-fresh *Poria cocos* 2-first shelling 3-second shelling 4-*Poria cocos* slice 5-*Poria cocos* cubes

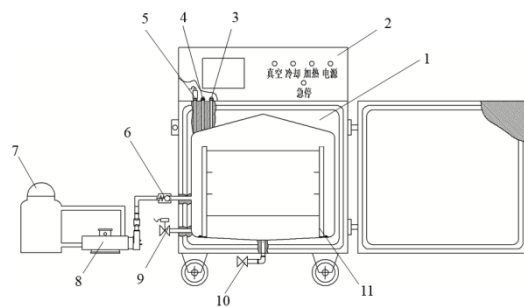
图 1 茯苓丁获取方法

Fig. 1 Method of obtaining *P. cocos* cubes

制成厚度为 12 mm 的茯苓片, 再切制成边长为 (12.0 ± 0.5) mm 的立方体茯苓丁, 备用。将切制的新鲜茯苓丁, 过筛(孔径 10 mm, 安徽顺天机械制造有限公司), 去除破碎颗粒, 2 kg/袋, 聚乙烯塑料袋密封包装, 置于 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 条件下冷藏, 备用。

1.2 干燥装备

采用 NT-V501 真空干燥装置和 NT-H101 倾斜式热风干燥装置(南京腾飞干燥装备有限公司)进行干燥实验, 干燥装置均安装有电能表, 可实时记录能耗数据。NT-V501 真空干燥装置结构如图 2 所示, 真空干燥装置由干燥室、冷凝系统、加热系统、真空系统、控制系统 5 部分组成。加热系统由碳纤维红外板供热, 料架底部安装有自动称量系统(杭州美控自动化技术有限公司), 实时获取茯苓丁质量变化情况, 精度为 ± 5 g; 当干燥设定含水率时, 自动停机并闪烁警示灯。干燥能耗由智能电表(浙江正泰电气股份有限公司)监测。控制系统的触摸屏



1-真空箱 2-控制箱 3-传感器接口 4-电源接口 5-压力传感器接口 6-单向阀 7-冷凝器机组 8-真空泵 9-电磁阀 10-手动球阀 11-料架
1-vacuum chamber 2-control chamber 3-sensor interface 4-power interface 5-pressure sensor interface 6-one-way valve 7-condenser unit 8-vacuum pump 9-electromagnetic valve 10-manual ball valve 11-rack

图 2 真空脉动干燥设备

Fig. 2 Pulsed vacuum dryer

(威纶通科技有限公司)可自动显示并存储干燥室压力、加热温度、能耗、干基含水率,以及设定的试验条件等参数。

NT-H101 倾斜式热风干燥具体结构如图 3 所示。其主要由电加热管、干燥室、离心风机、带有喷嘴的气流分配室、以及自动控制部分组成。热空气在高压离心风机的作用下,通过出风通道将具有一定温湿度与流速的热气流输送至气流分配室,其中内置有多个喷嘴的喷管组固定于气流分配室与干燥室之间。热气流在气流分配室的流场耦合作用下,经喷嘴以均匀流速水平地冲击料架上多排倾斜放置的物料。与此同时控制系统根据设定参数实时调节干燥室内的温度变化,当干燥室温度小于预设值时,电加热管工作;干燥室温度大于预设值时,电加热管停止工作,从而实现物料的快速干燥。干燥过程物料质量变化通过定时取样称重获取。

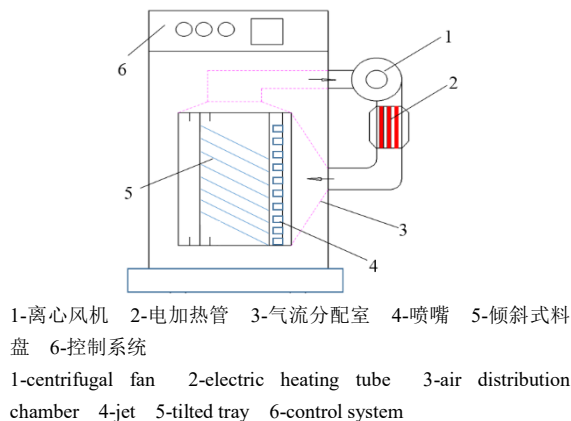


图 3 倾斜式热风干燥装置

Fig. 3 Inclined hot air dryer

1.3 茯苓丁干燥加工过程

将茯苓丁单层平铺于料盘中进行干燥,装载密度 $(3.5 \pm 0.1) \text{ kg/m}^2$ 。结合企业(安徽乔康药业有限公司)日常生产调度,3 个班组同时开展实验。先按设定温度进行真空干燥,当茯苓丁达到设定的切换含水率时,警示灯自动闪烁报警。人工转移料盘进行倾斜式热风干燥,直至干燥结束。

2 方法

2.1 响应面试验设计

在真空干燥单因素试验(温度 65、75、85 $^{\circ}\text{C}$)和热风干燥单因素(温度 65、75、85 $^{\circ}\text{C}$,风速 4 m/s)实验的基础上,以真空干燥温度(x_1 , 65~85 $^{\circ}\text{C}$)、切换水分比(x_2 , 65%~85%)、热风干燥温度(x_3 , 65~85 $^{\circ}\text{C}$)为影响因子,以干燥时间(y_1)、单位能耗(y_2)、多糖含量(y_3)、破碎率(y_4)为响应变

量,进行 Box-Behnken 设计(BBD)响应面实验,响应面因素水平及编码如表 1 所示。取 3 个重复测定的平均值作为实验结果,干燥结束后测定水溶性多糖含量和破碎率。

表 1 响应面因素水平

Table 1 Response surface factor level

水平	因素		
	$x_1/^{\circ}\text{C}$	$x_2/\%$	$x_3/^{\circ}\text{C}$
-1	65	70	65
0	75	80	75
+1	85	90	85

2.2 指标测定方法

2.2.1 茯苓丁的水分比(moisture ratio, MR) 不同时间 MR 的计算可简化为公式(1)计算^[18]。

$$\text{MR} = M_t / M_0 \quad (1)$$

M_t 为 t 时刻的干基含水率, M_0 为初始干基含水率

其中干基含水率的计算方法为

$$M_t = (W_t - G) / G \quad (2)$$

W_t 为干燥任意时刻的总质量, G 为绝干物质质量

2.2.2 茯苓丁破碎率测定 参考 GB-T4857.5-1992《包装运输件》破碎率测定标准,采用孔径为 8 mm 的振动筛进行区分完整和破碎颗粒。破碎率(μ)的计算公式如下。

$$\mu = m_{\text{crack}} / M_{\text{total}} \quad (3)$$

M_{total} 为干燥样品的总质量, m_{crack} 为破碎样品的质量

2.2.3 多糖含量测定方法 茯苓多糖的提取采用超声波提取法,原料预处理方法如下,称取 0.5 g 粉碎过 60 目(或 40 目)筛的样品,精确到 0.001 g,置于 50 mL 具塞离心管内,加入 25 mL 去离子水(料液比 1:50),同时使用涡旋振荡器振摇,使之混合。将样品置于超声提取器中(100 W)提取 30 min,超声起始温度为 28 $^{\circ}\text{C}$ 。提取结束后,冷却至 25 $^{\circ}\text{C}$,滤过,将上清液移至 100 mL 量瓶中,洗涤残渣 2~3 次,用水定容,移取 10 mL 于离心管内待测。具体测定方法见文献报道^[19]。

2.2.4 单位能耗(φ)计算方法 脱除单位质量水分所需要的能耗计算公式如下。

$$\varphi = Q_{\text{act}} / m_{\text{water}} \quad (4)$$

Q_{act} 为干燥结束时电表测定能耗, m_{water} 为干燥结束时物料脱水质量

2.3 多目标优化方法

2.3.1 适应度函数的建立 因相关评判指标(干燥

时间、单位能耗、多糖含量、破碎率)的量纲和参数变化范围存在较大差异。评判结合 Euclid 距离评判干燥工艺与最优干燥参数之间的差异,定义适应度函数如公式(5)所示^[20]。适应度函数值(f)越小,表明优化后的干燥工艺参数与理论最优值越接近。

$$\min f = \sum w_i (1 - k_i)^2 \quad (5)$$

$\min$ 为使 f 取最小值, i 为评价指标编号,取值 1~4; w_i 为指标对应的权重,为避免主观喜好影响评判结果,权重取相同值,均为 0.25; k_i 为第 i 个响应面回归方程计算值 f_{act} 和该指标最优值 f_{best} 的相关关系

对于望大型指标(多糖含量)、望小型指标(干燥时间、单位能耗、破碎率)的计算分别如公式(6)、(7)所示。式中 k_i 的值越趋近 1,表明计算值越接近最优解。

$$k_i = f_{\text{act}} / f_{\text{best}} \quad (6)$$

$$k_i = f_{\text{best}} / f_{\text{act}} \quad (7)$$

2.3.2 综合评分法 隶属度函数是综合评分优化的基础,望大型指标、望小型指标隶属度计算公式分别如下。

$$l_j = (f_j - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (8)$$

$$l_j = (f_{\max} - f_j) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (9)$$

$$S_j = \sum w_i l_j \quad (10)$$

$f_{\max}$ 为评价指标值对应的最大值, $f_{\min}$ 为评价指标值对应的最小值, f_j 为第 j 组试验获取的指标值, l_j 为第 j 组试验的隶属度, S_j 为第 j 组试验的综合评分值, w_i 为指标对应的权重,同公式(5),均为 0.25

2.3.3 遗传算法 该算法是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,具有良好的全局搜索性能,减少了限于局部最优解的风险,适用于并行处理,搜索不依赖于梯度信息。具体流程如图 4 所示,该方法通过编码方式选择、初始化种群确定、适应度函数和交叉变异运算,得到复杂多目标函数的最优解。

2.3.4 NSGA-II 算法 该算法与单目标优化问题只提供 1 个最优解不同,目标优化问题将提供 1 组点(称为 Pareto 最优集),表示冲突目标之间的权衡解。NSGA-II 算法是解决多目标优化问题最有力的方法之一。具体操作是基于 BBD 试验获取的二次回归模型构建的多目标优化适应度函数,并基于干燥参数调整范围确定约束条件,最后在 MATLAB 中编写 NSGA-II 算法代码,对多目标优化问题进行建模求解。具体流程如图 5 所示,该算法引入了快速非

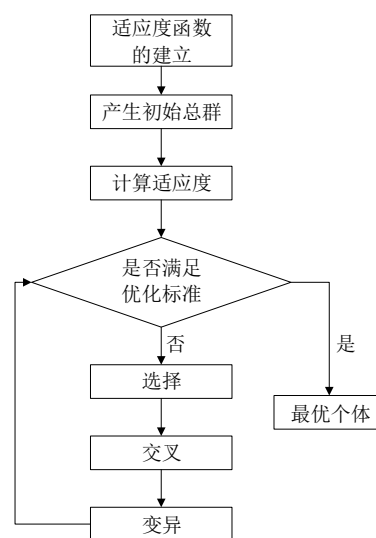


图 4 遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of genetic algorithm

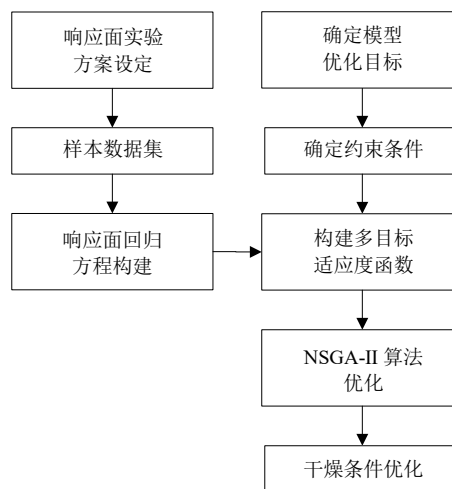


图 5 NSGA-II 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of NSGA-II algorithm

支配排序算法、精英策略、采用拥挤度和拥挤度比较算子,降低了算法的计算复杂度,使得 Pareto 最优解前沿中的个体能均匀地扩展到整个 Pareto 域,保证了种群的多样性^[16]。

3 结果与分析

3.1 单因素试验结果分析

真空干燥和热风干燥在不同干燥温度下茯苓丁的干燥特性曲线如图 6-A、B 所示。不同干燥方式下,温度对于干燥时间均有显著性影响,提高干燥温度均有利于缩短干燥时间。当干燥温度均为 65、75、85 °C 时,真空干燥干燥时间分别约为 650、500、350 min,热风干燥分别约为 325、215、150 min。同等温度下,热风干燥比真空干燥时间分别缩短了 46.20%、57.00%、57.14%。热风干燥效率显著高于

真空干燥效率。这可能是因为热风干燥过程中，由于高速气流连续冲击茯苓丁表面，造成表面快速失水结壳，内外水分分布不均，进而产生应力集中现

象，引起茯苓丁破碎，如图 6 中附图所示。而破碎的茯苓丁颗粒又进一步加速了物料失水。类似作用也会导致玉米裂纹^[21]、稻谷爆腰^[22]现象的发生。

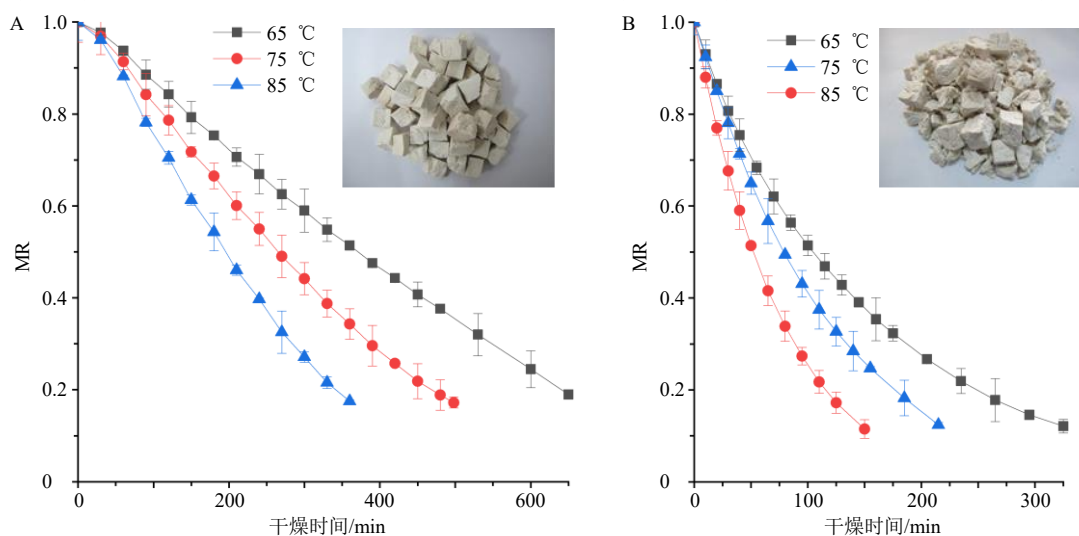


图 6 真空干燥 (A) 和热风干燥 (B) 结果

Fig. 6 Vacuum drying (A) and hot air drying (B) results

相比热风干燥茯苓丁，真空干燥茯苓丁外形紧实均匀。农产品物料体积收缩通常可划分为线性收缩和非线性收缩阶段。在线性收缩阶段，水分大量脱除，物料体积比与水分比成线性关系。随着干燥进行，部分物料颗粒开始凝固。当达到临界水分比时，进入非线性收缩阶段^[23]。体积收缩也变慢，直至固定不变。通常来讲，对应临界水分比，物料体积变化存在一个临界值，达到该临界值后，物料收缩过程几乎全部完成，不再受干燥失水过程的影响。利用真空干燥技术稳定茯苓丁外形，当达到该临界水分比后切换干燥方式，采用倾斜式热风干燥增强干燥强度。有可能提高干燥全过程干燥速率，有效缩短干燥时间，并降低茯苓丁破碎率。

不同干燥条件下的单位能耗、多糖含量、破碎率如图 7-A~C 所示。2 种干燥方式下，干燥温度对单位能耗均有显著影响，真空干燥能耗显著高于热风干燥；且温度越高，单位能耗越低。一方面是因为真空干燥箱功率大于热风干燥箱功率；另一方面因为真空装置的真空泵、热风装置的风机持续恒定功率运行，尽管升高温度会增加发热元件功耗，但温度升高，可有效缩短干燥时间，进而降低总能耗。也就是说，真空阶段干燥能耗和总的干燥时间是决定单位能耗的主要影响因素。

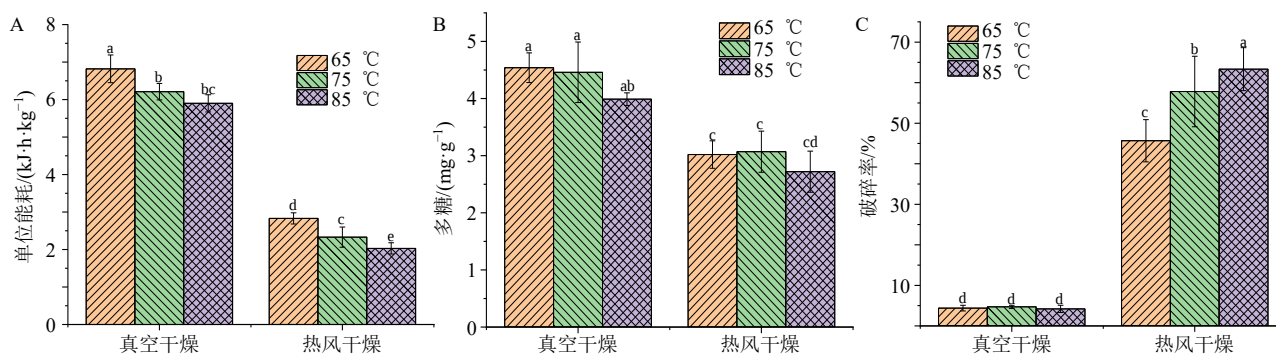
由图 7-B 可知，真空干燥茯苓多糖含量显著高于热风干燥，且升高干燥温度会降低多糖含量，这

可能是真空干燥有效降低氧气浓度，有利用有效成分的保持，而干燥温度过高会加剧有效成分的降解劣变。刘文山^[24]研究表明，茯苓 70 °C 热风干燥会显著降低茯苓品质，茯苓丁破碎率也明显增高，损耗增加。中医学也认为高温烘干也容易使茯苓带有“火性”，会影响茯苓的排湿利尿等药效作用^[25]。

不同干燥条件下茯苓丁的破碎率如图 7-C 所示。干燥方式和温度对于破碎率均有显著性影响。真空干燥茯苓丁破碎率为 4%~5%，但热风风干燥，茯苓丁破碎率为 45%~63%，且随热风干燥温度升高而升高，主要是因为热风干燥温度升高，加剧了茯苓丁内外水分、温度分布不均的情况。

3.2 响应面回归模型的建立

BBD 试验共 17 组试验点，中心试验重复 4 次用来估计试验误差。具体试验结果、各指标隶属度值、综合评分指标如表 2 所示。其中干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率变化范围分别为 172~343 min、1.24~4.04 kJ·h/kg、0.45~1.25 mg/g、3.79%~44.20%。用 Design Expert 软件对试验数据进行回归处理，得到 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 与 x_1 、 x_2 、 x_3 的回归方程分别为 $y_1 = 1\,988.11 - 7\,x_1 - 16.4\,x_2 - 11.96\,x_3 + 0.027\,5\,x_1x_2 + 0.01\,x_1x_3 + 0.015\,x_1^2 + 0.055\,x_2^2 + 0.058\,x_3^2$, $R^2 = 0.995$, $R_{adj}^2 = 0.989$, $R_{pre}^2 = 0.941$, 变异系数 1.90%; $y_2 = 37.98 - 0.39\,x_1 - 0.81\,x_2 + 0.44\,x_3 + 2.5 \times 10^{-3}\,x_1x_2 - 1.0 \times 10^{-4}\,x_1x_3 + 1.25 \times 10^{-4}$



不同字母 a~d 表示不同干燥条件下差异性显著 (显著性 $P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著
different letters a~d indicate significant difference ($P < 0.05$) of difference drying methods

图 7 不同干燥条件下评价指标结果

Fig. 7 Evaluation index results under different drying conditions

表 2 响应面试验结果及隶属度计算结果

Table 2 Response surface experiment results and membership function results

编号	试验条件			干燥时间/min			单位能耗/(kJ·h·kg ⁻¹)			多糖/(mg·g ⁻¹)			破碎率/%			综合评分
	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/\%$	$x_3/^\circ\text{C}$	均值	误差	隶属度	均值	误差	隶属度	均值	误差	隶属度	均值	误差	隶属度	
1	85	90	75	187	8	0.91	1.88	0.22	0.77	3.42	0.10	0.68	43.50	3.86	0.02	0.59
2	75	70	85	287	11	0.33	2.97	0.17	0.38	2.57	0.23	0.41	5.23	0.16	0.96	0.52
3	75	80	75	245	21	0.57	2.25	0.42	0.64	3.11	0.14	0.58	22.10	2.63	0.55	0.59
4	75	90	85	172	13	1.00	1.24	0.18	1.00	2.01	0.44	0.24	44.20	3.25	0.00	0.56
5	65	70	75	325	11	0.11	4.04	0.37	0.00	3.38	0.29	0.67	4.35	0.41	0.99	0.44
6	85	70	75	288	14	0.32	2.89	0.08	0.41	3.16	0.02	0.60	3.79	0.44	1.00	0.58
7	75	90	65	228	23	0.67	1.62	0.32	0.86	4.45	0.45	1.00	43.79	4.07	0.01	0.64
8	75	80	75	245	14	0.57	2.27	0.39	0.63	3.01	0.23	0.55	21.10	2.90	0.57	0.58
9	75	80	75	248	10	0.56	2.25	0.14	0.64	2.98	0.47	0.54	21.70	0.12	0.56	0.57
10	75	70	65	343	11	0.00	3.40	0.41	0.23	4.15	0.36	0.91	4.17	0.36	0.99	0.53
11	85	80	85	212	17	0.77	1.49	0.11	0.91	2.02	0.23	0.24	20.90	0.08	0.58	0.62
12	65	80	85	249	25	0.55	2.31	0.14	0.62	1.25	0.01	0.00	21.21	1.00	0.57	0.43
13	85	80	65	256	13	0.51	1.86	0.25	0.78	3.02	0.15	0.55	20.52	1.63	0.59	0.61
14	75	80	75	242	10	0.59	2.48	0.25	0.56	3.07	0.41	0.57	21.06	1.08	0.57	0.57
15	65	90	75	213	10	0.76	2.03	0.26	0.72	2.96	0.32	0.53	44.10	5.23	0.00	0.50
16	65	80	65	297	16	0.27	2.64	0.37	0.50	3.89	0.06	0.83	20.95	1.29	0.58	0.54
17	75	80	75	251	13	0.54	2.14	0.15	0.68	2.88	0.43	0.51	21.37	2.40	0.56	0.57

$x_2x_3 + 9.98 \times 10^{-4} x_1^2 + 3.32 \times 10^{-3} x_2^2 - 3.03 \times 10^{-3} x_3^2$, $R^2 = 0.989$, $R_{\text{adj}}^2 = 0.970$, $R_{\text{pre}}^2 = 0.901$, 变异系数 5.22%; $y_3 = 35.73 - 0.045 x_1 - 0.75 x_2 + 0.069 x_3 + 1.7 \times 10^{-3} x_1x_2 + 4.1 \times 10^{-4} x_1x_3 - 2.15 \times 10^{-3} x_2x_3 - 2.65 \times 10^{-3} x_1^2 + 4.85 \times 10^{-3} x_2^2 - 2.0 \times 10^{-3} x_3^2$, $R^2 = 0.993$, $R_{\text{adj}}^2 = 0.985$, $R_{\text{pre}}^2 = 0.940$, 变异系数 3.20%; $y_4 = 11.93 - 0.70 x_1 - 2.63 x_2 + 0.25 x_3 - 1.0 \times 10^{-4} x_1x_2 + 3.0 \times 10^{-4} x_1x_3 - 1.63 \times 10^{-3} x_2x_3 + 4.92 \times 10^{-3} x_1^2 + 0.03 \times 10^{-3} x_2^2 - 7.93 \times 10^{-4} x_3^2$, $R^2 = 0.999$,

$R_{\text{adj}}^2 = 0.999$, $R_{\text{pre}}^2 = 0.998$, 变异系数 0.79%。方程 $y_1 \sim y_4$ 的 R^2 分别为 0.995、0.989、0.993、0.999, 表明模型拟合、预测精度均较高, 可用于茯苓丁联合干燥工艺的分析 and 预测。

以评价指标为响应值, 对 BBD 试验得到的数据进行多元回归拟合建模, 使用方差分析法分析模型, 各评价指标方差分析结果如表 3 所示。

由方差统计结果可知, 4 个指标的回归方程均极显著 ($P < 0.001$), 失拟项均不显著, 表明试验数

表 3 回归方程系数显著性检验结果

Table 3 Results of statistical analyses on corresponding variables

误差来源	自由度	干燥时间			单位能耗			多糖含量			破碎率		
		均方差	F 值	P 值	均方差	F 值	P 值	均方差	F 值	P 值	均方差	F 值	P 值
模型	9	3 617.332	157.232	<0.001	0.862	57.962	<0.001	1.083	115.972	<0.001	351.221	2 541.151	<0.001
x_1	1	2 485.134	108.027	<0.001	1.053	70.585	<0.001	<0.001	0.263	0.624	0.452	3.262	0.114
x_2	1	24 531.122	1 066.246	<0.001	5.334	357.884	<0.001	0.022	2.374	0.168	3 122.483	22 591.674	<0.001
x_3	1	5 202.001	226.102	<0.001	0.297	19.142	0.003	7.336	788.056	<0.001	0.564	4.032	0.085
x_1x_2	1	30.254	1.312	0.290	0.253	16.793	0.005	0.124	12.428	0.010	<0.001	<0.001	0.959
x_1x_3	1	4.001	0.174	0.689	<0.001	0.027	0.875	0.678	72.256	<0.001	<0.001	0.026	0.876
x_2x_3	1	<0.001	<0.001	1.000	<0.001	0.042	0.844	0.183	19.875	0.003	0.117	0.762	0.411
x_1^2	1	9.792	0.435	0.535	0.042	2.812	0.137	0.304	31.774	0.001	1.026	7.374	0.030
x_2^2	1	128.537	5.598	0.050	0.462	31.215	<0.001	0.996	106.424	<0.001	36.914	267.056	<0.001
x_3^2	1	140.422	6.107	0.043	0.396	25.916	0.001	0.174	18.103	0.004	0.026	0.197	0.675
残基	7	23.012			0.015			0.009			0.145		
失拟项	3	38.083	3.252	0.142	0.014	0.934	0.505	0.011	1.431	0.358	0.068	0.356	0.790
纯误差	4	11.704			0.015			0.007			0.191		
总误差	16	32 717.064			7.872			9.783			3 161.963		

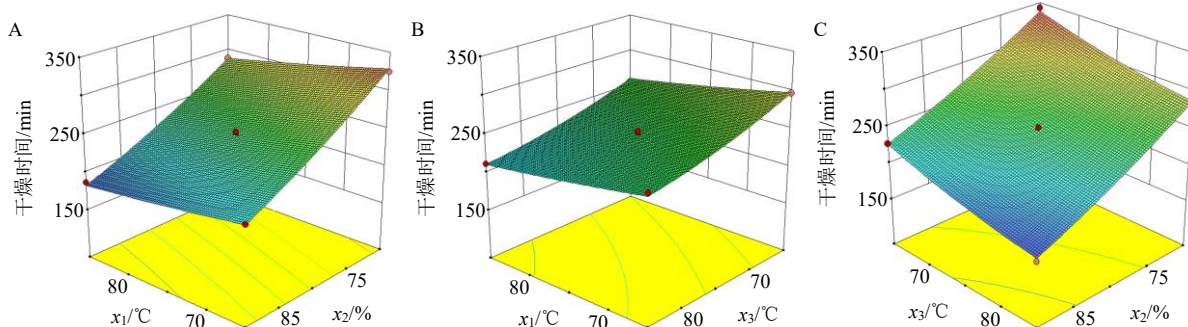
据与回归方程模型具有较好的拟合度。

通过比较表 3 中均方值,影响干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率工艺参数主次排序为 $x_2 > x_3 > x_1$ 、 $x_2 > x_1 > x_3$ 、 $x_3 > x_2 > x_1$ 、 $x_2 > x_3 > x_1$ 。其中, x_1 、 x_2 、 x_3 对干燥时间的影响均达极显著水平 ($P < 0.001$); x_1 、 x_2 对单位能耗的影响达到极显著水平 ($P < 0.001$), x_3 、交互作用项 x_1x_2 对单位能耗的影响达到显著水平 ($P < 0.05$); x_3 、交互作用项 x_1x_3 对多糖含量影响达到极显著水平 ($P < 0.001$),交互作用项 x_1x_2 、 x_2x_3 对多糖含量影响达到显著水平 ($P < 0.05$); x_2 对破碎率影响达极显著水平 ($P < 0.001$)。

3.3 影响因子交互作用分析

交互项对指标的影响分别如图 8、9 所示。各图是由响应值与各试验因子构成的曲面图,显示了 x_1 、 x_2 、 x_3 3 个影响因子,任意 1 个变量取零水平时,其余 2 个变量对考察指标的影响。

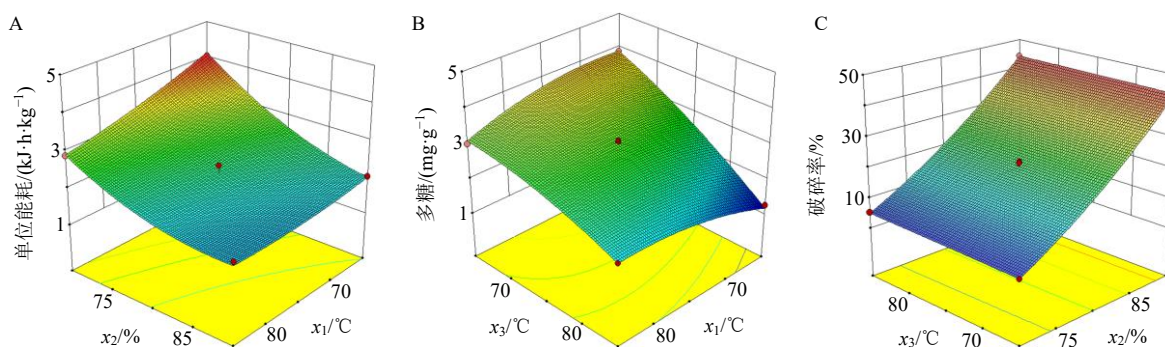
结合图 8-A、C 可知,随着切换水分比的降低,干燥时间急剧增加。一方面是因为切换水分比越低,需要的真空干燥时间越长。另一方面,前期真空干燥时间越长,茯苓丁形态固化效果越好,后期热风干燥引起的破速率也越低,内部水分迁移速率变慢,热风干燥时间相应延长,导致总干燥时间增加。切换水分比一定时,干燥时间随真空干燥温度、热风



A~C 分别为真空干燥温度 75 °C、切换水分比 80%、热风干燥温度 75 °C 时, x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_1x_3 交互项对干燥时间的影响
A~C was the interaction on drying time of x_1x_2 , x_2x_3 , and x_1x_3 with vacuum drying temperature 75 °C and switching moisture ratio 80%, and hot air drying temperature 75 °C

图 8 交互作用对干燥时间的影响

Fig. 8 Effect of interaction on drying time



A~C 分别为热风干燥温度 75 °C、切换水分比 80%、真空干燥温度 75 °C 时, x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_1x_3 交互项对单位能耗、多糖含量、破碎率的影响
A—C was the interaction on unit energy consumption, polysaccharide content and crushing rate of x_1x_2 , x_2x_3 , and x_1x_3 , respectively, with hot air drying temperature 75 °C, switching moisture ratio 80%, and vacuum drying temperature 75 °C

图 9 交互作用对单位能耗、多糖含量、破碎率的影响

Fig. 9 Effect of interaction on energy consumption, polysaccharide content and broken ratio

干燥温度的升高而降低,与单因素试验结果一致。由图 9-A 可知,单位能耗主要随切换水分比、真空干燥温度的降低而增加。这主要是真空干燥时间延长,真空机组长时间运行导致的。因此,茯苓联合干燥工艺需考虑单位能耗。图 9-B 可知,与单因素结果相一致,多糖含量均随真空干燥温度、热风干燥温度降低而增加。表明长时间的真空干燥、低温热风干燥有助于茯苓丁品质提升。破碎率是评价茯苓丁品质好坏的重要指标。如图 9-C 显示,破碎率随切换水分比的降低而降低,表明切换水分比的优化是调控茯苓丁破碎率的关键。

3.4 多目标工艺优化

3.4.1 适应度函数的建立 通过 Design Expert 软件对回归方程进行单目标优化,结果如表 4 所示,单目标优化的干燥时间、单位能耗、破碎率最小值分别为 171.3 min、1.28 kJ·h/kg、3.64%,多糖含量最大值为 4.46 mg/g。

将干燥时间 (y_1)、单位能耗 (y_2)、多糖含量 (y_3)、破碎率 (y_4) 的单目标优化最佳值,带入式方程 (5) 中得到优化的适应度函数。

$$\min f = 0.25[(1 - 171.3/y_1)^2 + (1 - 1.28/y_2)^2 + (1 - y_3/4.46)^2 + (1 - 3.64/y_4)^2] \quad (11)$$

表 4 单目标优化结果

Table 4 Single objective optimization results

指标	优化方向	影响因素			优化值
		真空干燥温度/°C	切换水分比/%	热风干燥温度/°C	
干燥时间/min	最小	83.38	88.89	84.65	171.30
单位能耗/(kJ·h·kg ⁻¹)	最小	81.64	89.60	85.00	1.28
水溶性多糖/(mg·g ⁻¹)	最大	71.80	89.92	65.00	4.46
破碎率/%	最小	84.31	70.02	66.87	3.64

3.4.2 综合评分法优化结果 通过多元回归拟合,得到综合评分 (S , 表 2) 和真空干燥温度 (x_1)、切换水分比 (x_2) 和热风干燥温度 (x_3) 的相关关系,如下式所示。

$$S = -2.557 + 0.036 x_1 + 0.054 x_2 - 0.017 x_3 - 1.3 \times 10^{-4} x_1 x_2 + 3.13 \times 10^{-4} x_1 x_3 - 1.69 \times 10^{-4} x_2 x_3 - 2.88 \times 10^{-4} x_1^2 - 1.82 \times 10^{-4} x_2^2 + 3.45 \times 10^{-5} x_3^2 \quad (12)$$

相关方差分析如表 5 所示, S 的回归方程极显著 ($P < 0.001$), 失拟项不显著 ($P > 0.05$) 说明此

回归方程比较可靠,可用于对 S 值的分析预测。由 P 值可知,各因素对综合品质值的影响大小依次为 $x_1 > x_2 > x_3$ 。

应用 Design-Expert 软件对回归方程 (12) 进行优化分析求解,得到综合评分法优化的最佳工艺参数,优化结果为真空温度 65.12 °C、切换水分比 70.07%、热风温度 74.19 °C,该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 330.4 min、4.13 kJ·h/kg、3.52 mg/g、4.48% (表 6)。

3.4.3 遗传算法优化结果 取群体数量 60, 交叉概率 0.6, 变异概率 0.06, 通过选择、交叉、变异操作形成新种群。遗传算法的终止以设定的循环次数为信号, 所求的最优解为当前种群的最佳个体。优化

结果为真空温度 82.23 °C、切换水分比 81.10%、热风温度 69.04 °C, 该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 245.27 min、2.01 kJ·h/kg、3.32 mg/g、23.05% (表 6)。

表 5 综合评分 S 值响应面回归模型方差分析

Table 5 Analysis of variance of membership degree of score response surface regression model

误差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	0.051 0	9	5.626×10^{-3}	53.102	<0.000 1	显著
x_1	0.030 0	1	0.030	280.661	<0.000 1	
x_2	6.055×10^{-3}	1	6.055×10^{-3}	57.154	0.000 1	
x_3	3.979×10^{-3}	1	3.979×10^{-3}	37.562	0.000 5	
x_1x_2	6.759×10^{-4}	1	6.750×10^{-4}	6.386	0.039 5	
x_1x_3	3.913×10^{-3}	1	3.913×10^{-3}	36.937	0.000 5	
x_2x_3	1.143×10^{-3}	1	1.143×10^{-3}	10.794	0.013 4	
x_1^2	3.492×10^{-3}	1	3.492×10^{-3}	32.954	0.000 7	
x_2^2	1.390×10^{-3}	1	1.390×10^{-3}	13.124	0.008 5	
x_3^2	5.022×10^{-5}	1	5.022×10^{-5}	0.471	0.513 3	
残基	7.417×10^{-4}	7	1.060×10^{-4}			
失拟项	5.974×10^{-4}	3	1.991×10^{-4}	5.522	0.066 2	不显著
纯误差	1.443×10^{-4}	4	3.608×10^{-5}			
总误差	0.051 0	16				
R^2	0.985 6					
R_{adj}^2	0.967 0					
R_{pre}^2	0.809 6					
变异系数/%	1.85					

表 6 综合评分法、遗传算法及 NSGA-II 算法优化的 Pareto 集

Table 6 Multi-objective optimization and fitness calculation results

优化方法	编号	干燥参数			评价指标				适应度
		真空干燥 温度/°C	切换水 分比	热风干燥 温度/min	干燥时间/ min	单位能耗/ (kJ·h·kg ⁻¹)	多糖/ (mg·g ⁻¹)	破碎率/ %	
综合评分法	1	65.12	70.07	74.19	330.40	4.13	3.52	4.48	0.235
遗传算法	2	82.23	81.10	69.04	245.27	2.01	3.32	23.05	0.283
NSGA-II 算法	3	65.04	70.00	70.96	340.86	4.22	3.87	4.21	0.222
	4	65.48	70.91	66.17	349.82	3.94	4.21	5.29	0.258
	5	66.32	73.22	68.44	324.47	3.57	3.83	8.97	0.312
	6	66.36	71.65	66.69	340.85	3.76	4.10	6.47	0.282
	7	66.49	73.57	69.46	318.45	3.53	3.71	9.58	0.317
	8	67.34	87.55	83.57	202.70	1.74	1.60	37.98	0.352
	9	67.60	82.28	84.07	228.76	2.04	1.48	26.14	0.377
	10	68.54	84.72	81.22	218.98	2.00	2.01	31.45	0.341
	11	68.80	88.23	84.82	195.01	1.57	1.53	39.70	0.347
	12	70.76	87.57	84.28	195.83	1.59	1.76	38.15	0.331

3.4.4 NSGA-II 算法优化结果 基于 NSGA-II 算法在建立的响应面模型内寻最优解, 设置种群规模为 40, 遗传代数为 200, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.1, 得到的最优成型工艺参数如表 6 所示。在大多数情况下类似于单目标优化的最优解在多目标问题中是不存在的, 只存在 Pareto 最优解, 它只是可以接受的“不坏”的解, 而且是 1 个解集。若 1 个多目标问题存在最优解, 则该最优解一定是 Pareto 最优解。优化结果为真空温度 65.04 °C、切换水分比 70%、热风温度 70.96 °C, 该条件下干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 340.86 min、4.22 kJ·h/kg、3.87 mg/g、4.21%。

相比综合评分法、遗传算法, 该多目标优化策略能够较好地实现多目标优化任务。因此, 针对特定工业应用场景, 可以从 Pareto 最优解集中挑出 1 个或部分解作为所求多目标优化问题的最优解。可便于茯苓丁工业化生产过程中, 根据实际生产需求, 灵活兼顾各个评判指标, 得出问题的最优决策方案。

3.4.5 优化结果分析及实验验证 结合式 (5), 得到综合评分法、遗传算法、NSGA-II 算法优化结果的适应度值。如表 6 所示, 适应度值越小说明优化效果越好。参考相关法规^[26-28]要求, 茯苓丁破碎率要求≤10%。由结果可知, 遗传算法优化结果最差; 综合评分法得出的 1 号方法, 以及 NSGA-II 算法优化的 3~7 号方案满足标准要求, 且 NSGA-II 算法得出的 3 号方案最优。NSGA-II 算法优化出的真空温度、切换水分比、热风温度分别为 65.04 °C、70%、70.96 °C; 对应的干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 340.86 min、4.22 kJ·h/kg、3.87 mg/g、4.21%。尽管遗传算法对应的干燥时间较短, 但茯苓丁破碎率高达 20%, 不能满足实际生产需求。相比前 2 种优化算法, NSGA-II 算法通过合理配置真空温度、切换水分比、热风温度, 尽管增加了干燥时间和单位能耗, 但提高了多糖含量并降低了破碎率, 满足药材加工企业品质至上的需求, 以及相关生产规范标准。NSGA-II 获取的最优工艺, 相比同等条件下的 65 °C 真空干燥, 时间缩短约 48%, 单位能耗缩短 39%, 但多糖含量、破碎率与真空干燥类似。

根据系统控制精度, 将最佳工艺参数修正为真空温度 65 °C、切换水分比 70%、热风温度 71 °C, 该工艺条件下的干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率分别为 (335±13) min、(4.28±0.32)

kJ·h/kg、(3.82±0.31) mg/g、(4.33±0.35) %。理论优化值在实验值范围内。所以, 经 NSGA-II 算法优化得到的工艺参数, 可满足茯苓丁干燥加工的工艺要求。

4 讨论

本研究研究了真空联合倾斜式热风干燥单因素试验对茯苓丁干燥特性的影响, 并考察了真空温度、切换水分比、热风温度及其交互作用对干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的影响。采用综合评分法、遗传算法、NSGA-II 算法对结果进行优化, 并进行试验验证。

单因素实验干燥表明, 干燥时间与干燥方式和干燥温度紧密相关, 相同干燥温度下, 真空干燥时间长于热风干燥。真空干燥茯苓丁外形完整, 脱水过程, 且存在体积变化临界点。随着干燥进行, 部分物料颗粒开始凝固, 物料体积变化存在一个临界值, 达到该临界值后, 物料收缩过程几乎全部完成, 不再受干燥失水过程的影响。此时采用倾斜式热风干燥不会增加茯苓破碎率。真空干燥方式多糖含量较高, 真空和热风高温干燥均会降低多糖含量。破碎率是茯苓丁加工品质的重要评判指标。单因素试验条件下, 真空温度对破碎率无显著性影响, 但破碎率随热风温度的升高而升高。

基于响应面试验结果, 构建二次多项式回归方程模型, 模型拟合精度均达极显著水平($P<0.0001$), 可用来分析和预测干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率指标。构建适应度函数, 通过综合评分出分法、遗传算法、NSGA-II 算法最优工艺的适应度值得分别为 0.235、0.283、0.222。结果表明, NSGA-II 算法优化结果最优, 且优化的 Pareto 集合具有多样性, 能很好满足实际生产需求。因此, 真空联合倾斜式热风干燥茯苓丁, 具有显著的节能增效作用, 可用于茯苓丁的干燥加工。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 邓桃妹, 彭代银, 俞年军, 等. 茯苓化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析 [J]. 中草药, 2020, 51(10): 2703-2717.
- [2] 孟美黛, 冯彦, 王鹏, 等. 茯苓极性提取物对 CUMS 大鼠神经递质及昼夜节律调节的实验研究 [J]. 中草药, 2020, 51(1): 118-126.
- [3] 倪付勇, 谢雪, 温建辉, 等. 茯苓非多糖类化学成分的抗补体活性 [J]. 中草药, 2019, 50(11): 2529-2533.
- [4] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同

- 干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324.
- [5] 许甜甜. 茯苓菌种制备技术及产地加工研究 [D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2013.
- [6] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 269-276.
- [7] Zhang W P, Pan Z L, Xiao H W, *et al.* Pulsed vacuum drying (PVD) technology improves drying efficiency and quality of *Poria cubes* [J]. *Dry Technol*, 2018, 36(8): 908-921.
- [8] Jaramillo N, Restrepo R, García C, *et al.* Comparative study of two methods of drying an electro-porcelain paste [J]. *Dry Technol*, 2012, 30(1): 37-43.
- [9] Krishnan K R, Rayaguru K, Nayak P K. Ultra-sonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices [J]. *Food Biosci*, 2020, 36: 100629.
- [10] Duarte C Y, Díaz O A, Osorio A J, *et al.* Development of fortified low-fat potato chips through vacuum impregnation and microwave vacuum drying [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 64: 102437.
- [11] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 干燥介质相对湿度对西洋参根干燥特性和品质的影响 [J]. 中草药, 2020, 51(3): 631-638.
- [12] Ju H Y, Zhao S H, Mujumdar A S, *et al.* Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models [J]. *Food Bioprod Process*, 2018, 111: 20-29.
- [13] 代建武, 肖红伟, 谢龙, 等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 238-244.
- [14] 周绪霞, 刘琳, 付鹏程, 等. 基于隶属度综合分析法的稻谷干燥—缓苏工艺优化研究 [J]. 中国粮油学报, 2018, 33(7): 110-117.
- [15] 李凯旋, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于 GA-BP 神经网络的蒜香调味粉制备工艺优化 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 150-159.
- [16] 贾梦科, 吴忠, 赵武奇, 等. 气体射流冲击干燥苹果片的响应面试验及多目标优化 [J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2695-2705.
- [17] 刘旭红, 刘玉树, 张国英, 等. 多目标优化算法 NSGA-II 的改进 [J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(15): 73-75.
- [18] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究 [J]. 中草药, 2018, 49(22): 5313-5319.
- [19] 张平, 郑志安, 张卫鹏, 等. 茯苓采后不同加工工艺模式评价 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 287-295.
- [20] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 34-39.
- [21] 魏硕, 陈鹏泉, 谢为俊, 等. 基于三维湿热传递的玉米籽粒干燥应力裂纹预测 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 296-304, 319.
- [22] 刘木华, 吴颜红, 曾一凡, 等. 基于玻璃化转变的稻谷爆腰产生机理分析 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 30-34.
- [23] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 基于温度梯度的带壳鲜花生热风干燥收缩模型研究 [J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 148-154.
- [24] 刘文山. 茯苓产地炮制方法研究及主要有害物质分析 [D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2009.
- [25] 张卫鹏. 茯苓干燥技术适应性及真空脉动干燥特性研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [26] DB42/353-2006. 九资河茯苓地方标准 [S]. 2006.
- [27] DB43/T845-2013. 靖州干茯苓 [S]. 2013.
- [28] DB34/T2550-2015. 茯苓种植技术规程 [S]. 2015.

[责任编辑 郑礼胜]