

茯苓丁真空脉动干燥特性及多目标优化

Pulsed vacuum drying characteristics and multi-objective optimization of Poria cubes

张卫鹏¹陈浩然¹范晓志¹ZHANG Wei-peng¹ CHEN Hao-ran¹ FAN Xiao-zhi¹肖红伟²郑志安^{2,3}巨浩羽⁴XIAO Hong-wei² ZHENG Zhi-an^{2,3} JU Hao-yu⁴

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083;

4. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061)

(1. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. China Research Center for Agricultural Mechanization Development, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

摘要:目的:探索真空脉动干燥过程中,干燥温度、真空时间、常压时间及其交互作用对茯苓丁干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的影响,以期得到较佳工艺参数,提高茯苓丁干燥效率和品质。方法:选取干燥温度(55~95 ℃)、真空时间(0~20 min)、常压时间(0~8 min)为自变量,设计中心复合响应面试验,分析影响规律;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,分别用遗传算法、隶属度法进行多目标优化,通过比较 2 种优化方法的结果,得到最佳工艺参数并进行实验验证。结果:干燥条件均可显著影响干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率;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($P < 0.001$),可用于对茯苓丁干燥评价指标的分析和预测;以适应度为评价指标,得出遗传算法的优化结果较优;遗传算法优化工艺为干燥温度 80.88 ℃、真空时间 7.68 min、常压时间 5.04 min,该工艺条件下的干燥时间为

443.3 min、单位能耗为 4.43 kJ · h/kg、多糖含量为 3.27 mg/g、破碎率为 7.42%,节能增效作用显著($P < 0.05$)。结论:真空时间和常压时间的合理配置可显著缩短干燥时间,并降低单位能耗和破碎率;茯苓丁内部温度随干燥室压力波动变化,适宜干燥温度可提高茯苓多糖含量;优化后的真空脉动干燥工艺,具有干燥时间短、品质好、破碎率低的优点。

关键词:干燥;真空脉动;茯苓丁;多目标优化;响应面法

Abstract: **Objective:** In order to explore the effects of drying temperature, vacuum duration, atmospheric duration and their interactions on drying time, specific energy consumption, polysaccharide content and broken ratio of Poria cubes in pulsed vacuum drying process, so as to obtain better drying parameters and improve the drying efficiency and quality of Poria cocos cubes. **Methods:** the drying temperature (55~95 ℃), vacuum duration (0~20 min) and atmospheric duration (0~8 min) were selected as independent variables, and central composite design of response surface method was used to analyze the drying process; The quadratic regression model of drying time, specific energy consumption, polysaccharide content and broken ratio was established; The fitness function was constructed, and the genetic algorithm and membership degree method were used to optimize the multi-objective process. By comparing the results of the two optimization methods, the optimal drying parameters were obtained and verified. **Results:** Drying time, specific energy consumption, polysaccharide content and broken ratio were signifi-

基金项目:国家自然科学基金(编号:31772026);现代农业产业技术体系建设专项资金资助(编号:CARS-21);北京市自然科学基金(编号:6204035);北京市优秀人才培养资助(青年骨干个人)项目(编号:2018000020124G034);河北省高等学校科学研究项目(编号:QN2021054)

作者简介:张卫鹏,男,北京工商大学讲师,博士。

通信作者:郑志安(1965—),男,中国农业大学副教授,博士。

E-mail: zhengza@cau.edu.cn

收稿日期:2021-03-27

cantly affected by drying conditions; The regression model of Drying time, specific energy consumption, polysaccharide content and broken ratio was statistically significant ($P < 0.001$), which could be used to analyze and predict the drying process of *poria cocos*; Results proved that the genetic algorithm was better, the optimum drying conditions were as follows: drying temperature 80.88 °C, vacuum duration 7.68 min, atmospheric duration 5.04 min. The drying time, specific energy consumption, polysaccharide content and broken ratio were 443.3 min, 4.43 kJ · h/kg, 3.27 mg/g, 7.42%, respectively. The optimum drying conditions can significant ($P < 0.05$) save energy and improve the drying efficiency. **Conclusion:** Reasonable configuration of vacuum duration, atmospheric duration can significantly shorten the drying time, and specific energy consumption, and broken ratio; The internal temperature of *poria cubes* fluctuates with the pressure change of drying chamber, and the appropriate drying temperature can increase polysaccharide content; The optimized pulsed vacuum drying process has the advantages of shorter drying time, better quality and lower broken ratio, which can provide theoretical basis and technical support for the industrial processing of *poria cubes*.

Keywords: drying; vacuum; *poria cube*; multi-objective optimization; response surface methodology

茯苓(*Poria cocos*), 多孔菌科真菌茯苓的干燥菌核, 日常食用的茯苓饼、茯苓糕皆以其为原料, 目前被广泛应用于保健品和化妆品领域。干燥是茯苓丁加工的主要环节, 由于茯苓丁具有特殊的商品属性, 其售价与外观紧密相关, 质地紧实、棱角分明者售价较高。但目前自然晾晒所需时间长, 且易发霉变色; 熏硫处理容易使其物料变性失效; 持续的热风干燥易造成茯苓丁内外温度、水分分布不均, 导致茯苓丁破裂, 降低商品属性。间歇式热风干燥时间通常 > 24 h, 效率较低。

高振江等^[1]提出了真空脉动干燥技术, 间歇式改变真空干燥室压力, 有助于提升胡萝卜块的干燥速率。张壁光等^[2]通过对干燥室压力的调控, 不断打破木材表面水蒸气分压的平衡状态, 并实现干燥能量的间歇式供给, 有效提高了干燥效率和干燥品质, 提出了浮压干燥技术。适宜的间歇式干燥参数可加速物料的质热传递^[3-4], 目前已被应用于葡萄^[5]、柠檬片^[6]、西洋参片^[7]的干燥中。薛令阳等^[8]设计了加热面积约为 1 m^2 的真空脉动干燥样机。张卫鹏等^[9]对比了茯苓丁的热风干燥、气体射流干燥、红外干燥和真空脉动干燥特性, 指出了真空脉动干燥方式较优, 但尚未探明干燥条件对理化指标的影响规律, 且未给出优化的工艺参数。

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。为平衡各目标参数, 凌铮铮等^[10]采用隶属度综合评分法优化了花生微波热风

联合干燥工艺, 但该方法主观性强, 多目标优化误差较大。席慧涵^[11]采用多种神经网络模型优化了马铃薯远红外干燥工艺, 并指出遗传算法具有较佳的全局寻优能力。贾梦科^[12]研究了苹果片气体射流干燥过程, 并采用遗传算法和隶属度综合评分法对干燥参数进行多目标优化, 所得到的工艺具有复水性好、维生素 C 含量高的特点。巨浩羽等^[13]优化了茯苓丁真空联合倾斜式热风干燥工艺, 但该干燥方式需要真空干燥后, 人工转移料盘, 再进行倾斜式热风干燥, 劳动强度大, 操作不便。而针对茯苓丁真空脉动干燥, 尚未有可直接用于工业化生产的优化试验参数。

文章拟采用真空脉动干燥技术, 系统考察干燥温度、真空时间、常压时间对干燥时间、单位能耗、多糖含量和破碎率的影响规律, 并对比遗传算法、隶属度综合评分法的多目标寻优结果, 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依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

新鲜茯苓: 安徽金寨乔康药业种植基地;

圆孔筛: BC-10 型, 孔径 10 mm, 安徽顺天机械制造有限公司;

切丁机: QDJ-1/2 型, 岳西县岳工机械厂;

真空脉动干燥装置: YZG-VD01 型, 南京腾飞干燥设备有限公司;

碳纤维红外板: IR6090 型, 上海热丽科技集团有限公司;

自动称量系统: MIK-1100 型, 杭州美控自动化技术有限公司;

针型温度传感器: PT100 型, 杭州美控自动化技术有限公司;

智能电表: DTS5188 型, 浙江正泰电气股份有限公司;

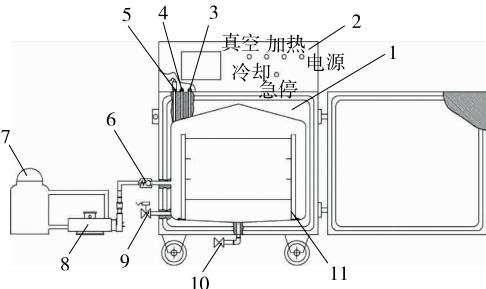
控制系统触摸屏: MT8071iE 型, 威纶通科技有限公司。

1.2 茯苓丁原料的获取

新鲜茯苓采摘后置于温度 $(24 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(95 \pm 4)\%$ 的环境中发汗 3 d^[14]。去除黑褐表皮和赤茯苓, 采用切丁机切制成边长为 $(12.0 \pm 0.5) \text{ mm}$ 的立方体, 过 10 mm 筛, 去除破碎颗粒, 每 2 kg 一袋, 聚乙烯塑料袋密封包装, 置于 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 下冷藏备用。

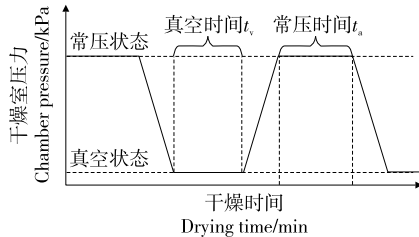
1.3 真空脉动干燥装置

如图 1 所示, 真空脉动干燥装置由干燥室、冷凝系统、加热系统、真空系统、控制系统 5 部分组成, 干燥室通过电磁阀与外界相连。调节电磁阀开闭, 可使干燥室压力在真空和常压状态之间连续波动变化。真空时间、常



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

(a) 真空脉动干燥装置结构简图



(b) 干燥室压力变化曲线

图1 真空脉动干燥装置结构简图及干燥室压力变化曲线
Figure 1 Pulsed vacuum dryer chart and chamber pressure change curve

压时间可手动设定,时间控制精度为 ± 5 s。干燥室压力切换速率 (75 ± 8) kPa/min,压力切换时间 < 2 min。

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,实时获取茯苓丁质量变化情况,精度为 ± 5 g。针型温度传感器可插入茯苓丁内部监测物料温度变化,精度为 ± 0.1 °C。干燥能耗由智能电表监测。控制系统的触摸屏可自动显示并存储干燥室压力、加热温度、能耗、干基含水率等参数。

1.4 响应面优化试验

在前期单因素试验的基础上^[15],以干燥温度 $(65 \sim 85$ °C)、真空时间 $(4 \sim 16$ min)、常压时间 $(2 \sim 8$ min)为影响因子,以干燥时间 (y_1) 、单位能耗 (y_2) 、多糖含量 (y_3) 和破碎率 (y_4) 为响应变量,进行中心复合响应面试验,干燥结束后测定水溶性多糖和破碎率。将茯苓丁单层平铺于料盘中进行干燥,装载密度 (3.5 ± 0.1) kg/m²。结合企业生产调度情况,3个班组同时开展试验,结果取均值。

1.5 指标测定

1.5.1 干燥时间测定 以茯苓丁干基含水率从初始值 1.04 g/g降低至 0.17 g/g的时间作为干燥总时间,并按式(1)计算干基含水率。

$$W_t = \frac{M_t - M_G}{M_G}, \quad (1)$$

式中:

W_t —— t 时刻物料的干基含水率,g/g;

M_t —— t 时刻物料的质量,g;

M_G ——干物质质量,g。

1.5.2 单位能耗计算方法 脱除单位质量水分所需要的能耗按式(2)计算。

$$\varphi = \frac{Q_{\text{act}}}{M_{\text{water}}}, \quad (2)$$

式中:

φ ——单位能耗,kJ·h/kg;

Q_{act} ——干燥结束时智能电表测定的总能耗,kJ·h;

M_{water} ——干燥结束时物料脱水质量,kg。

1.5.3 破碎率测定 干燥后的茯苓丁采用振动筛区分物料等级,感官评价标准:① I级品,立方体外形基本完整、质地紧实、边角有部分缺陷,切面有凸凹注点或少量裂隙;② II级品,干燥过程中产生不完整茯苓块、破碎的边角颗粒等;③ III级品,筛选后残余不规则细小碎粒及粉末、无大块碎片。人工称重,并按式(3)计算破碎率。

$$\mu = \frac{m_{\text{II}} + m_{\text{III}}}{m_{\text{I}} + m_{\text{II}} + m_{\text{III}}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

μ ——破碎率,%;

m_{I} ——I级品质量,kg;

m_{II} ——II级品质量,kg;

m_{III} ——III级品质量,kg。

1.5.4 多糖含量测定 称取 0.500 g粉碎过 60 目(或 40 目)筛的样品,于 50 mL具塞离心管内,加入 25 mL去离子水,涡旋振荡器振匀,于超声提取器中, 100 W下提取 30 min,超声起始温度 28 °C。提取结束后,冷却至 25 °C,过滤,将上清液移至 100 mL容量瓶中,洗涤残渣 $2 \sim 3$ 次,定容,移取 10 mL于离心管内待测。具体测定方法参考文献^[16]。

1.6 多目标优化方法

遗传算法是通过编码方式选择、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。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,需结合Euclid距离,定义适应度函数^[17]:

$$\min f = \sum w_i (1 - k_i)^2, \quad (4)$$

式中:

i ——评价指标编号,取 $1 \sim 4$;

w_i ——指标对应的权重,均为 0.25 ;

k_i ——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(多糖含量)、望小型指标(干燥时间、单位能耗、破碎率)分别按式(5)和式(6)计算。

$$k_i = \frac{f_{\text{act}}}{f_{\text{best}}}, \quad (5)$$

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

其中 k_i 越趋近 1,表明计算值越接近最优解。

隶属度函数是综合评分优化的基础,对望大型、望小型指标隶属度为:

$$l_j = \frac{f_j - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, \tag{7}$$

$$l_j = \frac{f_{\max} - f_j}{f_{\max} - f_{\min}}, \tag{8}$$

$$S_j = \sum w_i l_j, \tag{9}$$

式中:

$f_{\max}$ ——评价指标值对应的最大值;

$f_{\min}$ ——评价指标值对应的最小值;

f_j ——第 j 组试验获取的指标值;

l_j ——第 j 组试验的隶属度;

S_j ——第 j 组试验的综合评分值。

2 结果与分析

2.1 响应面回归模型的建立

在前期单因素试验的基础上,以干燥温度、真空时间、常压时间为试验因素,以干燥时间、单位能耗、多糖含量和破碎率为响应值,进行中心复合响应面试验设计。试验因素水平及编码见表 1,试验设计与结果见表 2。

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行回归处理,得到干燥时间(y_1)、单位能耗(y_2)、多糖含量(y_3)、破碎率(y_4)及综合评分(S)与各因素变量的回归方程:

$$y_1 = 4\ 948.73 - 93.13A - 54.4B - 71.82C + 0.36AB + 0.61AC - 1.24BC + 0.49A^2 + 1.28B^2 + 5.33C^2, \tag{10}$$

$$y_2 = 3.16 + 0.037A + 0.11B - 0.50C + 0.010\ 8BC - 0.00B^2 + 0.015C^2, \tag{11}$$

$$y_3 = -14.75 + 0.51A + 0.16B - 0.55C + 0.013AB - 0.003A^2 - 0.005B^2 + 0.013C^2, \tag{12}$$

表 1 响应面因素水平及编码[†]

Table 1 Response surface factor level and coding

水平	A 干燥温度/℃	B 真空时间/min	C 常压时间/min
−2	55	0	0
−1	65	5	2
0	75	10	4
1	85	15	6
2	95	20	8

[†] 常压时间 0 min 表示恒真空干燥,真空时间 0 min 表示干燥室真空度达到设定阈值(94±2) kPa 后,立即切换到常压状态,继续进行常压干燥。

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 j	A	B	C	干燥时间/min			单位能耗/(kJ·h·kg ^{−1})			多糖含量/(mg·g ^{−1})			破碎率/%			S 值
				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	0	−2	0	790	9	0.32	3.74	0.20	0.64	2.90	0.46	0.29	6.29	0.45	0.20	0.36
2	0	2	0	539	18	0.74	3.38	0.77	0.72	3.64	0.33	0.55	5.71	0.73	0.39	0.60
3	0	0	0	488	15	0.82	2.72	0.77	0.86	3.27	0.46	0.42	6.16	0.54	0.24	0.59
4	−1	−1	1	786	23	0.32	4.39	0.62	0.50	2.05	0.29	0.00	5.37	0.13	0.50	0.33
5	0	0	0	471	23	0.85	3.08	0.86	0.78	3.66	0.31	0.55	5.62	0.20	0.42	0.65
6	0	0	0	479	13	0.84	3.67	0.96	0.66	2.89	0.68	0.29	5.64	0.63	0.41	0.55
7	−1	1	−1	681	20	0.50	5.28	0.49	0.31	3.95	0.74	0.65	5.16	0.43	0.57	0.51
8	−2	0	0	980	21	0.00	6.69	0.38	0.00	3.20	0.19	0.40	3.84	0.17	1.00	0.35
9	1	−1	1	489	22	0.82	2.13	0.10	0.99	3.41	0.81	0.47	6.18	0.80	0.24	0.63
10	0	0	−2	570	13	0.69	4.82	0.33	0.41	4.96	0.66	1.00	6.20	0.26	0.23	0.58
11	1	1	1	434	12	0.91	2.20	0.32	0.97	3.58	0.35	0.53	6.20	0.21	0.23	0.66
12	−1	−1	−1	760	13	0.37	4.58	0.13	0.46	3.81	0.20	0.60	5.53	0.47	0.45	0.47
13	1	−1	−1	424	17	0.93	2.55	0.93	0.90	3.61	0.19	0.54	6.35	0.16	0.18	0.64
14	2	0	0	382	10	1.00	2.08	0.73	1.00	3.71	0.89	0.57	6.90	0.12	0.00	0.64
15	0	0	0	472	22	0.85	3.06	0.77	0.79	3.07	0.08	0.35	5.36	0.73	0.50	0.62
16	0	0	2	574	19	0.68	3.09	0.65	0.78	2.35	0.90	0.10	6.26	0.45	0.21	0.44
17	−1	1	1	648	16	0.56	3.72	0.65	0.64	3.01	0.23	0.33	5.32	0.70	0.52	0.51
18	1	1	−1	407	14	0.96	2.49	0.73	0.91	4.48	0.75	0.84	6.29	0.61	0.20	0.73
19	0	0	0	482	12	0.83	3.07	0.42	0.79	3.25	0.31	0.41	6.28	0.13	0.20	0.56
20	0	0	0	478	17	0.84	3.54	0.87	0.68	3.59	0.41	0.53	5.63	0.15	0.42	0.62

$$y_4 = 8.99 + 0.022A + 0.43B - 0.39C - 0.002AB - 0.005AC + 0.34BC - 0.00028A^2 - 0.012B^2 + 0.017C^2,$$
(13)

$$S = 0.60 - 0.089A + 0.051B - 0.03C - 0.12AB + 0.11BC - 0.022A^2 - 0.026B^2 - 0.018C^2.$$
(14)

由表3可知,评价指标值 $y_1 \sim y_4$ 对应的回归方程达极显著水平($P < 0.0001$),综合评分 S 值回归方程达显著水平($P < 0.05$),表明试验数据与回归方程模型具有较好的拟合度。一次项 A 、 B 、 C 、交互项 AB 、 AC 、 BC 及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 对干燥时间的影响极显著($P < 0.01$)。一次项 A 、 B 、 C 、交互项 BC 及二次项 B^2 、 C^2 对单位能耗的影响极显著($P < 0.01$)。一次项 A 、 B 、 C 、交互项 AB 及二次项 A^2 对多糖含量的影响极显著($P < 0.01$)。一次项 A 、 B 、 C 、交互项 BC 及二次项 B^2 对破碎率的影响极显著($P < 0.01$)。一次项 A 、 B 对综合评分值 S 的影响极显著($P < 0.01$),一次项 C 和二次项 A^2 、 B^2 对综合评分值 S 的影响显著($P < 0.05$)。由 F 值可知,各干燥条件对综合评分值 S 的影响大小依次为干燥温度>真空时间>常压时间。

2.2 影响因子交互作用分析

2.2.1 干燥时间 由图2可知,干燥时间随干燥温度的增加而减小,干燥温度越高,加热板对物料的传热效率越高,温度梯度的增加加速了内部水分向外扩散迁移。常压时间一定时,干燥时间随真空时间的增加先减小后增加。真空状态下,水分沸点降低,利于物料脱水。真空时间过短,有效真空干燥时间减少,干燥速率降低,干燥总时间对应增加;真空时间过长,茯苓丁表面的水蒸气分压

容易与干燥室内的水蒸气分压处于平衡状态,物料表面湿度梯度降低,从而降低物料脱水效率^[18]。表2数据也显示恒真空干燥不利于茯苓丁脱水,75℃下,常压时间为0时,干燥时间延长至570 min;而常压时间为4 min时,干燥时间仅需480 min。真空时间一定时,干燥时间随常压时间的增加先减小后增加。常压时间过短,干燥过程等同于恒真空干燥,会降低茯苓丁脱水效率;常压时间过长会缩短茯苓丁有效真空干燥时间,不利于干燥速率的提升。综上,真空时间与常压时间合理配置,才能有效缩短干燥时间,与枸杞^[19]、南瓜片^[20]、大蒜^[21]的结论一致。

真空时间、常压时间还会通过物料内部温度影响干燥速率。当常压时间4 min、真空时间10 min、干燥温度75℃时,茯苓丁内部温度变化曲线如图3所示,总体呈波动上升趋势。干燥过程中物料吸收的热量,一部分用于水分蒸发,一部分用于物料升温。真空干燥时,水分沸点降低,水分的急剧蒸发会带走大部分热量,物料内部温度迅速降低,不利于物料脱水^[22]。此时,需要将干燥室压力切换为常压状态,使吸收的热量主要用于物料升温,待物料温度上升后,再切换为真空状态,进入快速脱水阶段。

2.2.2 单位能耗 由图4可知,单位能耗随真空时间的增加而增加,是因为真空脉动干燥装置中,真空系统是主要耗电单元,真空系统的持续工作,特别是真空泵频繁启停会显著增加能耗。单位能耗随常压时间的增加而增加,是因为常压阶段内,物料脱水速率较低,会导致干燥总时间增加。而加热系统在常压阶段依然会持续供电,增加能耗。因此,真空脉动干燥需要设置合理的压力切

表3 方差统计结果分析
Table 3 Analysis of variance results

方差来源	自由度	干燥时间 y_1		单位能耗 y_2		多糖含量 y_3		破碎率 y_4		S 值	
		F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
模型	9	791.73	<0.000 1	104.62	<0.000 1	19.38	<0.000 1	39.08	<0.000 1	9.64	0.000 7
A	1	5 475.12	<0.000 1	68.99	<0.000 1	5.15	<0.000 1	97.68	<0.000 1	51.89	<0.000 1
B	1	327.68	<0.000 1	366.84	<0.000 1	59.87	<0.000 1	99.50	<0.000 1	16.94	0.002 1
C	1	16.38	0.002 3	460.48	<0.000 1	72.62	<0.000 1	101.34	<0.000 1	5.97	0.034 7
AB	1	42.89	<0.000 1	1.30E-03	0.971 2	5.15	0.002 3	1.61	0.232 6	0.47	0.507 6
AC	1	19.73	0.001 3	1.30E-03	0.971 2	6.25	0.410 1	1.36	0.270 3	0.19	0.671 3
BC	1	20.56	0.001 1	10.39	0.009 1	1.63	0.230 3	12.62	0.005 2	0.38	0.553 5
A ²	1	995.08	<0.000 1	0.38	0.552 2	33.68	0.000 2	0.27	0.614 2	5.01	0.049 2
B ²	1	430.44	<0.000 1	16.25	0.002 4	4.81	0.053 1	31.36	0.000 2	6.96	0.024 8
C ²	1	191.72	<0.000 1	11.06	0.007 7	0.78	0.397 6	1.50	0.248 1	3.37	0.096 3
残基	10										
失拟项	5	1.96		2.37		1.35		0.51		8.93	
纯误差	5										
总误差	19										

† $R_{y_1}^2 = 0.998, R_{y_2}^2 = 0.989, R_{y_3}^2 = 0.945, R_{y_4}^2 = 0.972, R_S^2 = 0.907$ 。

换参数,降低单位能耗,既要降低真空泵运行时间,又要缩短干燥总时间。

2.2.3 多糖含量 由图 5 可知,干燥温度一定时,多糖含量随真空时间的增加而增加,可能是因为真空干燥阶段物料温度较低,且可避免与外界氧气长时间的接触,有利

于有效成分的保持。真空时间一定时,多糖含量随干燥温度的增加先增加后减小,干燥温度较低时,干燥总时间较长,长时间的干燥处理容易造成物料品质劣变;高温干燥可有效缩短干燥总时间,但过高干燥温度通常会导致物料表面焦糊变性。因此,干燥温度选择需要考虑品质变化。

2.2.4 破碎率 由图 6 可知,破碎率随真空时间的减小而降低,可能是因为干燥前期茯苓丁含水率较高,真空时

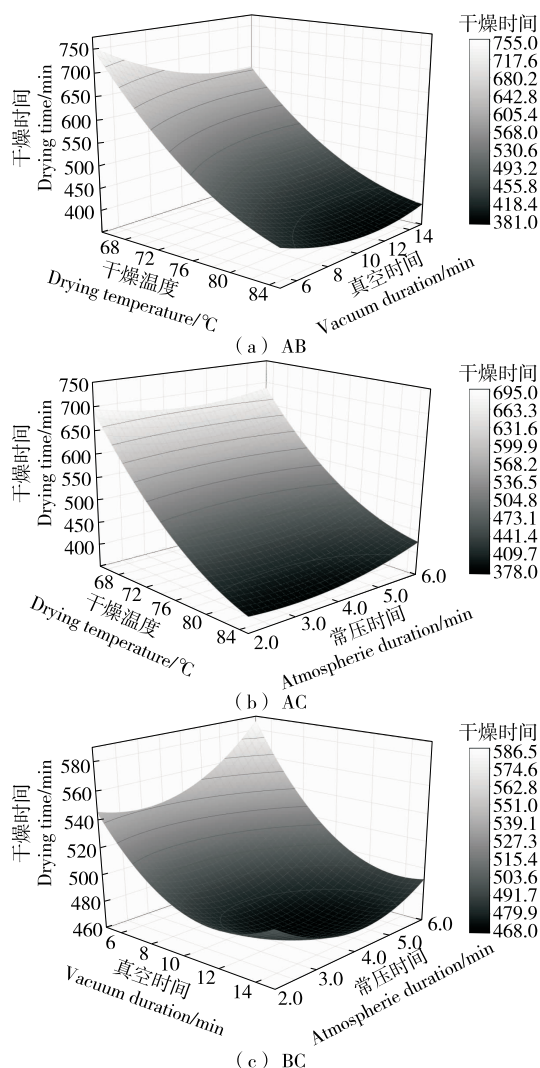


图 2 交互作用对干燥时间的影响

Figure 2 Effect of interaction on drying time

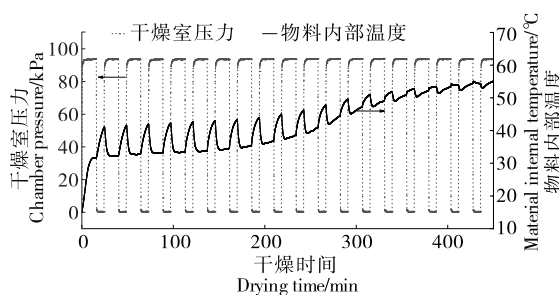


图 3 茯苓内部温度和干燥室压力的变化曲线

Figure 3 Typical change curves of material internal temperature and chamber pressure

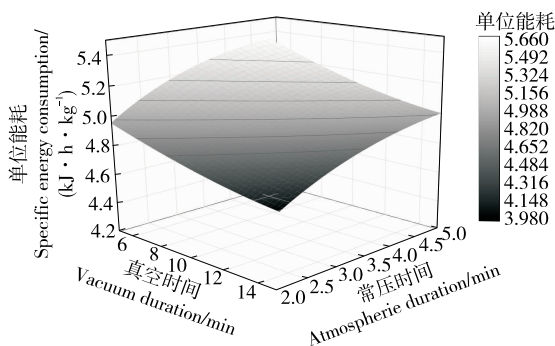


图 4 真空时间与常压时间的交互作用对单位能耗的影响
Figure 4 Effect of interaction between vacuum duration and atmospheric duration on specific energy consumption

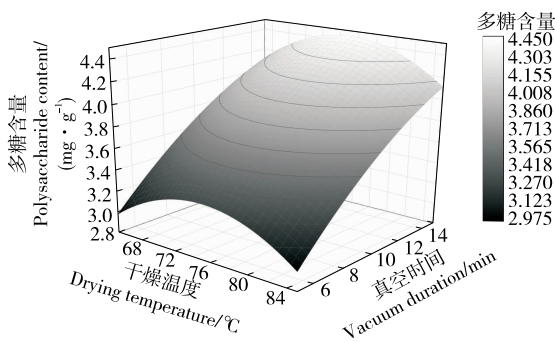


图 5 干燥温度与真空时间的交互作用对多糖含量的影响
Figure 5 Effect of interaction between drying temperature and vacuum duration on polysaccharide content

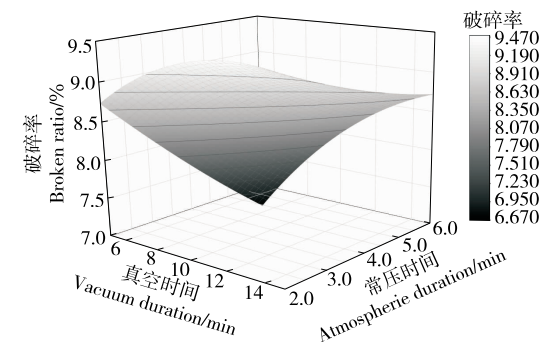


图 6 真空时间与常压时间的交互作用对破损率的影响
Figure 6 Effect of interaction between vacuum duration and atmospheric duration on broken ratio

间的缩短会相应增加干燥室压力变化的频率;而频繁的压力变化可使物料内部微观孔道扩张收缩、甚至进一步破裂连通,从而有效缓解温度梯度、湿度梯度不均造成的应力集中现象^[23-24]。破碎率随常压时间的增加而减小,是因为常压时间增加,干燥总时间会显著增加,物料脱水速率降低,水分缓慢向外迁移,减缓了物料内部水分分布不均的状况^[25-26]。

2.3 多目标工艺优化及实验验证

通过 Design-Expert 软件对 $y_1 \sim y_4$ 对应的回归方程进行单目标优化,结果见表 4。单目标优化的干燥时间、单位能耗、破碎率最小值分别为 381 min、3.51 kJ·h/kg、5.99%,多糖含量最大值为 4.99 mg/g。

表 4 单目标优化结果

Table 4 Single objective optimization results

指标	单位	优化方向	干燥温度/℃	真空时间/min	常压时间/min	优化值
干燥时间	min	最小	84.96	11.52	3.96	381.00
单位能耗	kJ·h/kg	最小	65.00	5.00	6.00	3.51
多糖含量	mg/g	最大	75.00	15.00	2.00	4.99
破碎率	%	最小	85.00	5.00	6.00	5.99

表 5 多目标优化及适应度计算结果[†]

Table 5 Multi objective optimization and fitness calculation results

优化方法	干燥参数			评价指标				适应度 f
	干燥温度/℃	真空时间/min	常压时间/min	干燥时间/min	单位能耗/(kJ·h·kg ⁻¹)	多糖含量/(mg·g ⁻¹)	破碎率/%	
遗传算法	80.87	7.68	5.04	445.45	4.42	3.27	7.42	0.219
隶属度法	65.00	5.00	6.00	783.40	3.51	2.27	7.31	0.594
理论值	81.00	7.70	5.00	443.30	4.43	3.27	7.40	0.218
实测值	81.00	7.70	5.00	457.00	4.48	3.31	7.18	0.215

[†] 茯苓丁破碎率要求≤10%^[26]。

适应度值越小说明优化效果越好。由表 5 可知,遗传算法的优化结果较优,优化出的干燥温度为 80.88℃、真空时间为 7.68 min、常压时间为 5.04 min。相比隶属度法,遗传算法通过升高干燥温度,合理配置真空时间和常压时间,尽管增加了单位能耗,但显著缩短了干燥总时间,并提高了多糖含量。根据系统控制精度,将最佳工艺参数修正为干燥温度 81℃、真空时间 7.7 min、常压时间 5.0 min,此时干燥时间为 443.3 min、单位能耗为 4.43 kJ·h/kg、多糖含量为 3.27 mg/g、破碎率为 7.42%。该工艺条件下的实测值分别为 (457±15) min、(4.48±0.27) kJ·h/kg、(3.31±0.24) mg/g、(7.18±0.53)%,干燥品质满足行业规范要求。因此,经遗传算法优化得到的工艺参数,可满足真空脉动干燥茯苓丁的工艺要求。

3 结论

通过响应面试验,构建了真空脉动干燥茯苓丁的二

将单目标优化最佳值分别代入式(4)~式(6)中得到适应度函数为:

$$\min f = 0.25 \left[\left(1 - \frac{381}{y_1} \right)^2 + \left(1 - \frac{3.51}{y_2} \right)^2 + \left(1 - \frac{y_3}{4.99} \right)^2 + \left(1 - \frac{5.99}{y_4} \right)^2 \right] \quad (15)$$

借助 Matlab 软件,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,求取多目标优化的最优解。通过 Design-Expert 软件对综合评分 S 对应的回归方程进行单目标优化,得到隶属度法优化的最佳工艺参数。遗传算法和隶属度法的优化结果见表 5。

次多项式回归模型,并用来分析和预测其干燥参数对干燥时间、单位能耗、多糖含量、破碎率的影响。对比遗传算法、隶属度综合评分法的多目标优化结果,遗传算法的优化效果最佳。真空脉动干燥茯苓丁的最佳工艺参数为:干燥温度 81℃、真空时间 7.7 min、常压时间 5.0 min,该工艺下的干燥时间为 (457±15) min、单位能耗为 (4.48±0.27) kJ·h/kg、多糖含量为 (3.31±0.24) mg/g、破损率为 (7.18±0.53)%,说明真空脉动具有干燥时间短、品质好、破碎率底的优点,可用于茯苓丁的工业化加工。尽管真空脉动干燥方法具有节能增效的优势,但干燥室压力的调控仍需依靠大量试验,设置固定干燥参数。而如何基于物料状态变化,自动实现干燥参数的自适应调控是未来亟需突破的问题。

致谢:衷心感谢南京腾飞干燥装备有限公司提供相关技术和装备支持。

参考文献

- [1] 高振江, 吴定伟, 张树阁, 等. 滚筒式真空脉动干燥机设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 113-116, 127.
GAO Zhen-jiang, WU Ding-wei, ZHANG Shu-ge, et al. Design of pulsed vacuum drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 113-116.
- [2] 张璧光, 常建民, 伊松林, 等. 浮压下马尾松的干燥特性及水分迁移机理初探[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5): 612-614.
ZHANG Bi-guang, CHANG Jian-min, YI Song-li, et al. The preliminary study of drying characteristics and mechanism of water movement on masson pine under floating pressures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 612-614.
- [3] HE Zheng-bin, QIAN Jing, QU Li-jie, et al. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying[J]. Results in Physics, 2019, 12: 1 299-1 303.
- [4] KUMAR C, KARIM M A, JOARDDER M U. Intermittent drying of food products: A critical review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 48-57.
- [5] WANG Jun, MU W S, FANG Xiao-ming, et al. Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 106: 117-126.
- [6] WANG Jun, LAW C L, NEMA P K, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 129-138.
- [7] WANG Jun, BAI Tian-yu, WAND Dong, et al. Pulsed vacuum drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices: Effects on drying characteristics, rehydration ratio, water holding capacity, and microstructure[J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 301-311.
- [8] 薛令阳, 王书茂, MUJUMDAR A S, 等. 基于干燥均匀性的真空脉动干燥加热控制技术[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 317-325.
XUE Ling-yang, WANG Shu-mao, MUJUMDAR A S, et al. Heating control technology of vacuum pulse drying based on drying uniformity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 317-325.
- [9] 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.
ZHANG Wei-peng, GAO Zhen-jiang, XIAO Hong-wei, et al. Drying characteristics of poria cocos with different drying methods based on Weibull distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 317-324.
- [10] 凌铮铮, 任广跃, 段续, 等. 间歇微波-热风耦合干燥花生工艺优化及品质研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 189-195, 233.
LING Zheng-zheng, REN Guang-yue, DUAN Xu, et al. Research on process optimization and quality of intermittent microwave-hot air coupling drying peanut[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 189-195, 233.
- [11] 席慧涵, 刘云宏, 王琦, 等. 马铃薯超声强化远红外辐射干燥特性及神经网络模型研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 123-128, 152.
XI Hui-han, LIU Yun-hong, WANG Qi, et al. Drying characteristics and neural network model of ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on potato[J]. Food & Machinery, 2019, 35(2): 123-128, 152.
- [12] 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): 2 695-2 705.
JIA Meng-ke, WU Zhong, ZHAO Wu-qi, et al. Response surface design and multi-objective optimization of apple slices dried by air-impingement[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(15): 2 695-2 705.
- [13] 巨浩羽, 郑志安, 赵士豪, 等. 真空联合倾斜式热风干燥茯苓的响应面试验及多目标优化[J]. 中草药, 2021, 52(8): 2 294-2 305.
JU Hao-yu, ZHENG Zhi-an, ZHAO Shi-hao, et al. Response surface design and multi-objective optimization of Poria cocos cubes drying by vacuum combined inclined hot air[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(8): 2 294-2 305.
- [14] 张平, 郑志安, 江庆伍. 茯苓采后不同预处理方式对其品质及干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 294-304.
ZHANG Ping, ZHENG Zhi-an, JIANG Qing-wu. Effects of different pretreatment methods on quality and drying characteristics of Poria cocos after harvest[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(20): 294-304.
- [15] ZHANG Wei-peng, PAN Zhong-li, XIAO Hong-wei, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) technology improves drying efficiency and quality of Poria cubes [J]. Drying Technology, 2018, 36(8): 908-921.
- [16] 景永帅, 孙丽丛, 程文境, 等. 微波辅助法提取多糖的研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 228-232.
JING Yong-shuai, SUN Li-cong, CHENG Wen-jing, et al. Research progress in microwave-assisted extraction of polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 228-232.
- [17] 王阳阳, 黄勋, 陈浩, 等. 基于同态滤波和改进 K-means 的苹果分级算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 47-51, 112.
WANG Yang-yang, HUANG Xun, CHEN Hao, et al. Research on apple classification algorithm based on homomorphic filtering and improved K-means algorithm[J]. Food & Machinery, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- [18] XIE L, ZHENG Z A, MUJUMDAR A S, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) of wolfberry: Drying kinetics and quality attributes[J]. Drying Technology, 2018, 36(12): 1 501-1 514.
- [19] 白竣文, 周存山, 蔡健荣, 等. 南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 290-297.
BAI Jun-wen, ZHOU Cun-shan, CAI Jian-rong, et al. Vacuum pulse drying characteristics and moisture content prediction of pumpkin slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 290-297.

(下转第 144 页)

- DENG Li-miao, DU Hong-wei, XU Yan, et al. Implementation of intelligent potato grading method based on computer vision[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 145-150.
- [5] 王红军, 熊俊涛, 黎邹邹, 等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 272-277.
- WANG Hong-Jun, XIONG Jun-Tao, LI Zou-Zou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 272-277.
- [6] 田芳, 彭彦昆, 魏文松, 等. 基于机器视觉的马铃薯黑心病检测机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 287-294.
- TIAN Fang, PENG Yan-kun, WEI Wen-song, et al. Design and experiment of detection mechanism for potato blackheart based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 287-294.
- [7] 张撒. 基于图像处理技术测量马铃薯表形特征[J]. 物理实验, 2017, 37(7): 53-55.
- ZHANG Sou. Potato phenotypic characteristics based on image processing[J]. Physics Experimentation, 2017, 37(7): 53-55.
- [8] 向静, 何志良, 汤林越, 等. 结合计算机视觉的马铃薯外部品质检测技术[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 165-169.
- XIANG Jing, HE Zhi-liang, TANG Lin-yue, et al. Research of potato quality detection technology based on computervision[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(5): 165-169.
- [9] 李玉华, 李天华, 牛子儒, 等. 基于色饱和度三维几何特征的马铃薯芽眼识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 158-164.
- LI Yu-hua, LI Tian-hua, NIU Zi-ru, et al. Potato bud eyes recognition based on three-dimensional geometric features of color saturation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 158-164.
- neering, 2018, 34(24): 158-164.
- [10] 许伟栋, 赵忠盖. 基于 PCA-SVM 算法的马铃薯形状分选[J]. 控制工程, 2020, 27(2): 246-252.
- XU Wei-dong, ZHAO Zhong-gai. Potato shape sorting based on PCA-SVM algorithm[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(2): 246-252.
- [11] 王润涛, 李明, 龚振平. 基于双目视觉的球形果实单体采摘终端装置研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 93-100.
- WANG Run-tao, LI Ming, GONG Zhen-ping. Research on spherical fruit picking terminal device based on binocular vision[J]. Food & Machinery, 2018, 34(7): 93-100.
- [12] 李明, 王润涛, 赵忠媛. 马铃薯自动选种催芽系统研究[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(4): 489-494.
- LI Ming, Wang Run-tao, ZHAO Zhong-yuan. Study on automatic seed selection and Germination of potato[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2019, 41(4): 489-494.
- [13] 芦范. 基于改进神经网络算法的蔬菜图像识别[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 146-150.
- LU Fan. Vegetable image recognition based on improved neural network algorithm[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 146-150.
- [14] 邓羽翔, 罗诚, 李东亮. 基于 BP 神经网络的烟叶醇化感官质量仿真模拟[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 161-165.
- DENG Yu-xiang, LUO Cheng, LI Dong-liang. Simulation of sensory quality of tobacco leaf alcoholization based on BP neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 161-165.
- [15] 秦正龙, 冯长君. 基于神经网络的菠萝香气成分色谱保留值研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 30-33.
- QIN Zheng-long, FENG Chang-jun. Quantitative structure retention relationship studies of aroma components from pineapple based on neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 30-33.
- (上接第 98 页)
- [20] 乔宏柱, 高振江, 王军, 等. 大蒜真空脉动干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 256-263.
- QIAO Hong-zhu, GAO Zhen-jiang, WANG Jun, et al. Optimization of vacuum pulsed drying process of garlic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 256-263.
- [21] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETAIN H, et al. Effects of pre-freezing on the drying characteristics, structural formation and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 170-177.
- [22] MOUNIR S, ALLAF T, MUJUMDAR A S, et al. Swell drying: Coupling instant controlled pressure drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality: An overview[J]. Drying Technology, 2012, 30(14): 1 508-1 531.
- [23] 任爱清, 邓珊, 唐小闲, 等. 香菇脆片真空油炸—真空微波联
- 合干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 165-170.
- REN Ai-qing, DENG Shan, TANG Xiao-xian, et al. Process optimization of vacuum-frying combined with vacuum-microwave drying in producing shiitake mushroom chips[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 165-170.
- [24] JOARDDER M U H, BROWN R J, KUMAR C, et al. Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(10): 2 327-2 337.
- [25] NUGRAHA B, VERBOVEN P, JANSSEN S, et al. Non-destructive porosity mapping of fruit and vegetables using X-ray CT[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2019, 150: 80-88.
- [26] 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: 30-33.
- ZHANG Wei-peng. The adaptability and drying characteristics of pulsed vacuum drying technology for poria cocos[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 30-33.