

# 基于响应面法的枸杞热风微波联合间歇干燥工艺探究

王鹤, 慕松, 李天聪, 吴俊, 谢亚星, 陈星名, 刘帅帅

(宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021)

**摘要:** 为了探究枸杞微波干燥工艺, 保证枸杞干燥品质, 本文利用热风-微波组合干燥实验装置, 对枸杞微波间歇干燥进行实验研究。根据响应面法设计理论, 以干燥平均速率  $v$ 、单位质量能耗  $Q$  和感官品质作为目标, 利用隶属度的综合评分法对 3 个目标综合评分, 探讨了微波功率密度、风速、微波脉冲比、微波介入时含水率对枸杞微波间歇干燥工艺的影响, 建立了枸杞微波间歇干燥的二次多项式回归模型, 并对枸杞微波间歇干燥工艺参数进行优化。结果表明: 4 个因素对综合得分的影响大小依次为: 微波功率>脉冲比>含水率>风速; 枸杞微波间歇干燥的最佳工艺参数为: 微波功率为 210 W~216 W、脉冲比为 1.8、风速为 0.7 m/s, 初始含水率 48%~50%, 此时得到的枸杞干果品质最优, 为进一步研究枸杞微波干燥设备及工艺提供了理论依据。

**关键词:** 枸杞; 微波间歇干燥; 工艺参数优化; 响应面分析法

文章篇号: 1673-9078(2018)02-134-140

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.2.022

## Study on the Combination of Hot Air Microwave and Intermittent Drying Process of Chinese Wolfberry Based on Response Surface Methodology

WANG He, MU Song, LI Tian-cong, WU Jun, XIE Ya-xing, CHEN Xing-ming, LIU Shuai-shuai

(School of mechanical engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to explore the microwave drying process of chinese wolfberry and ensure the quality of wolfberry drying, the hot air-microwave drying experimental device was combined with the microwave intermittent drying of wolfberry in this work. According to the design theory of response surface methodology, taking the average drying rate  $v$ , the energy consumption per unit mass  $Q$  and the sensory quality as target parameters, the comprehensive rating method of membership degree was used to evaluate the three targets comprehensively. According to Box-Benhnken design theory, the response surface methodology was adopted to discuss the effects of microwave power density, wind speed, microwave pulse ratio and microwave interventional moisture content on the microwave and intermittent drying process of wolfberry. Meanwhile the quadratic polynomial regression model was established to optimize microwave intermittent drying process parameters of wolfberry. The results showed that the effects order of four factors on the comprehensive scores were as follows: microwave power > pulse ratio > moisture content > wind speed. The optimal parameters of microwave intermittent drying were microwave power of 210 W-216 W, pulse ratio of 1.8, wind speed of 0.7 m/s and the initial moisture content of 48%-50%. The quality of dried fruit of wolfberry was optimal at this time, which provided a theoretical basis for further research on microwave drying equipment and technology of wolfberry.

**Key words:** chinese wolfberry; microwave intermittent drying; optimization of process parameter; response surface methodology

枸杞是宁夏的特色产品, 除少量用于鲜食和加工原料外, 大部分用于干制<sup>[1]</sup>。在常温条件下, 枸杞极易因微生物和酶的作用导致腐烂变质, 难以久藏, 使其货架期大大缩短。如将新鲜枸杞加工成干制品, 则可以很好地延长产品货架期, 同时还可降低保存和运输成本。自然晾晒干燥周期长、易受污染且受环境因素影响剧烈, 有效成分损失较大, 干燥品质极不稳定, 易出现腐烂、焦黑、褐变和糖分溢出等现象; 热风干燥虽能满足工业化生产需求, 但干燥耗时较长, 一般为 72 h, 枸杞营养成分散失多, 能源利用率低且污染环境, 采用微波干燥能大大提高枸杞的干燥速率。

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 宁夏回族自治区科技支撑计划项目 (NXK-2015122503)

作者简介: 王鹤 (1992-), 男, 学生, 硕士研究生, 研究方向: 现代设计方法及 CAE 技术

通讯作者: 慕松 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工

国内外许多研究人员采用微波间歇干燥方法对马尾松、花椒、巴西坚果、菠菜和胡萝卜等物料进行干燥研究, 并取得了较好效果。实践证明, 微波间歇干燥与传统的干燥方法相比, 不仅加热时间短、干燥成

本较低、而且能有效避免因过热而烧伤农产品,保证干燥品质<sup>[2]</sup>。迄今为止,关于枸杞微波间歇干燥的相关研究尚未见到,因此有必要对其进行深入研究。

本文对枸杞微波间歇干燥进行了以微波功率、脉冲比、微波介入时枸杞含水率、风速为影响因素,以干燥速率、单位质量能耗以及干燥品质为响应指标的响应面法中心组合试验,根据试验结果得到微波功率、脉冲比、微波介入时含水率和风速与干燥工艺综合得分的关系模型,基于此模型对干燥中各因素进行了分析并得出枸杞微波间歇干燥的最佳工艺参数,研究结果为枸杞微波间歇干燥装置的设计提供理论依据<sup>[3]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本次实验选用的枸杞为宁杞1号,采摘地点为宁夏回族自治区银川市西夏区丰庆沟枸杞种植园,枸杞初始含水率为78%~80%,采摘后的枸杞置于4℃的保鲜柜中储存。

### 1.2 设备



图1 ORW.S-R型智能微波热风联合干燥实验工作站

Fig.1 ORW.S-R intelligent microwave hot air combined drying experimental workstation

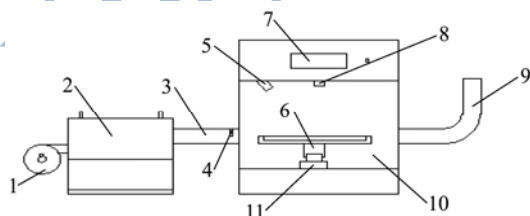


图2 智能微波热风联合干燥系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of intelligent microwave hot air combined drying system

注:1、热风机;2、电加热;3、进风管道;4、温度传感器;5、红外温度传感器;6、物料托盘;7、控制器显示屏;8、波导入口;9、出风管道;10、干燥腔体;11、质量传感器。

本文采用到的仪器设备有:DHG-9030型电热鼓风干燥烘箱(上海恒一科学仪器有限公司);ORW.S-R型智能微波热风联合干燥实验工作站(南京澳润微波科技有限公司);JA21002型电子精密天平(上海恒平电子天平有限公司)。智能微波热风联合干燥实验工作站其外部结构如图1所示,微波炉经过改进可自动控制微波接通与关闭时间;电子天平和温度传感器均与PLC连接,通过自编的应用程序在显示屏上实时显示目前质量和温度并记录。

微波热风联合干燥实验工作站的设备结构示意图如图2所示。

### 1.3 实验方法

试验设计运用响应面设计理论,响应面设计方法能用较少的试验去估算一阶、二阶与一阶具交互作用项之多项式模式设计分析模型<sup>[4]</sup>。根据相关文献和多因素试验方法,选取微波功率、微波脉冲比、微波介入时枸杞含水率、风速进行响应面的分析试验。微波功率(W),微波脉冲比,初始含水率(%),风速(m/s)如公式(1)进行编码<sup>[5]</sup>。

$$z_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta_j} \quad (1)$$

式中, $z_j$ 为自然变量(编码值); $x_j$ 为规范变量(实际值); $x_{j0}$ 为因素的零水平; $\Delta_j$ 为因素的变化间距<sup>[3]</sup>。

以干燥功率 $x_1$ 、脉冲比 $x_2$ 、风速 $x_3$ 和初始含水率 $x_4$ 作为试验因素,以干燥速率 $v$ 、单位质量能耗 $e$ 和感官品质 $Q$ 为考核指标进行响应面组合设计<sup>[6]</sup>。根据前期单因素试验中风速对干燥速率的影响试验结果知,枸杞微波干燥时,为保证水分的及时排出,干燥过程中需一直通风;由于枸杞的果实为浆果,其糖分主要贮存在果实的薄壁细胞内,并且外表皮上无气孔器的分布<sup>[7]</sup>,当枸杞含水率较高时由于微波功率较大易造成内部升温太快导致果皮破裂糖分溢出,影响干燥感官品质;通过前期微波加热枸杞预试验知:当干燥量在200~400g之间时,在功率250W时枸杞均出现焦化和糖分溢出等现象严重,在功率200W时枸杞除个别发黄以外感官品质较好,在功率150W时感官品质较好但是速率太慢能耗较大,因此考虑到感官品质、速率、以及单位质量能耗制定实验功率为三个阶段(180W、200W、220W);所以我们采取前期热风处理将枸杞含水率降至30%、40%和50%三个阶段时介入微波干燥。

### 1.4 微波间歇干燥工艺指标

#### 1.4.1 微波间歇脉冲比<sup>[8]</sup> (Pulse Ratio)

按公式(2)进行计算。

$$PR = \frac{T_e + T_h}{T_e} \quad (2)$$

式中:  $T_e$ -微波接通时间;  $T_h$ -微波间歇时间。

### 1.4.2 干燥平均速率 $v$ (g/s)

干燥平均速率是反映干燥快慢的指标, 其值越大则干燥一定量枸杞所需的时间越短<sup>[9]</sup>。干燥平均速率  $v$  如式(3)计算:

$$v = \Delta M / \Delta T \quad (3)$$

式中,  $\Delta M$  为干燥至安全含水率时枸杞减少的质量, g;  $\Delta T$  为枸杞干燥至安全含水率所用的总时间, 其值等于微波接通总时间与间歇总时间之和, s。

### 1.4.3 单位质量能耗 $e$ (J/g)

单位质量能耗是指脱去每克水的耗能量, 它反映干燥过程的能量损耗, 其值应越小越好<sup>[10]</sup>。单位质量能耗  $e$  如式(4)计算:

$$e = \frac{P \times \Delta T_2}{\Delta M} \quad (4)$$

式中,  $P$  为微波功率, W;  $\Delta T_2$  为微波接通的总时间, s。

### 1.4.4 综合指标

运用隶属度的综合评分法将干燥总平均速率、单位质量能耗和感官品质得分3项指标对枸杞干燥工艺进行综合评分。干燥平均速率和感官品质得分隶属度如工式(5)计算:

$$l = \frac{c_{\min} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (5)$$

式中,  $c_i$  为指标值;  $c_{\min}$  为指标最小值;  $c_{\max}$  为指标最大值。

按照式(6)对三项指标得隶属度数值进行综合计算得干燥工艺得综合品质得分

$$s = al_v + bl_e + cl_q \quad (6)$$

式中,  $l_v$  为干燥速率隶属度;  $l_e$  为能耗隶属度;  $l_q$  为感官品质隶属度;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为各指标权重。

本文考虑以感官品质为主要指标, 干燥总平均速率和单位质量能耗为次要指标, 于是取  $a=0.3$ ,  $b=0.3$ ,  $c=0.4$ 。在具体应用中可根据不同要求取相应的权重, 只需满足  $a+b+c=1$  即可<sup>[11]</sup>。

$$S = -19.06821 + 0.099737x_1 + 4.38365x_2 + 14.39272x_3 + 1.454 \times 10^{-3}x_4 - 7.387 \times 10^{-3}x_1x_2 - 4.375 \times 10^{-3}x_1x_3 + 8.25 \times 10^{-5}x_1x_4 + 0.56091x_2x_3 + 0.018346x_2x_4 - 0.01575x_3x_4 - 2.0606 \times 10^{-4}x_1^2 - 1.0815x_2^2 - 9.91743x_3^2 - 3.84243 \times 10^{-4}x_4^2 \quad (8)$$

风速 ( $C^2$ ), 均为差异极显著影响因素 ( $p < 0.01$ )。失拟项为差异显著影响因素 ( $p < 0.05$ )<sup>[21]</sup>。

该模型的纯误差的均方值较小为 0.000907, 说明此型有效, 应用响应面法优化枸杞微波间歇干燥工艺

### 1.4.5 数据统计分析

确定干燥功率  $x_1$ 、脉冲比  $x_2$ 、风速  $x_3$  和初始含水率  $x_4$  的水平及编码见表 1。

表 1 试验因子水平

因素	水平		
	-1	0	1
微波功率 $x_1$ /W	180	200	220
脉冲比 $x_2$	2	1.67	1.5
风速 $x_3$ /(m/s)	0.6	0.7	0.8
初始含水率 $x_4$ /%	30	40	50

利用 Design-Expert 软件对实验进行 Box-Behnken Design 设计, 通过该软件对所得结果进行拟合, 通过分析  $R^2$  得到枸杞的干燥模型, 决定系数  $R^2$  如式(7)所示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,mean} - MR_{exp,i})^2} \quad (7)$$

式中,  $MR_{pre,i}$  为利用模型预测综合得分;  $MR_{exp,i}$  为干燥实验实际得分;  $MR_{pre,mean}$  为实验实测评分平均值;  $N$  为实验数据点的个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验设计方案及结果

根据响应面法设计理论, 设定干燥功率  $x_1$ 、脉冲比  $x_2$  和风速  $x_3$  初始含水率  $x_4$  试验 4 个因素水平, 以干燥平均速率  $v$ 、单位质量能耗  $e$  和感官品质  $Q$  为考核指标进行响应面组合设计, 通过隶属度的综合评分法对枸杞微波间歇干燥的工艺进行响应面分析<sup>[12]</sup>。表 2 为响应面试验设计与试验结果。

多元 Box-Behnken Design 回归拟合<sup>[13]</sup>, 得到综合得分  $s$  对其影响的关键因子 (微波功率  $x_1$ 、脉冲比  $x_2$  和风速  $x_3$  初始含水率) 的二次多项式回归模型如式(8)所示:

可行。由综合品质得分  $S$  的回归系数检验值  $F^{[16]}$  可知, 各因素对枸杞微波间歇干燥综合因素影响的大小依次为: 干燥功率 (A) > 初始含水率 (D) > 脉冲比 (B) > 风速 (C)。

表2 试验设计及其结果

Table 2 Experimental design and results

编号	因素水平编码				响应值						
	微波功率 $x_1/w$	脉冲比 $x_2$	风速 $x_3(m/s)$	初始含水率 $x_4/\%$	干燥速率/(g/s)	能耗/(J/g)	感官品质	干燥速率隶属度值	能耗隶属度值	感官品质隶属度值	综合评分 S
1	180	2	0.7	40	0.000698	261098.90	8	0.011	0.053	0.750	0.245
2	220	2	0.7	40	0.0021	102628.65	7	0.389	0.765	0.583	0.560
3	180	1.5	0.7	40	0.000914	197027.02	9	0.069	0.341	0.917	0.405
4	220	1.5	0.7	40	0.004367	50373.668	3.5	1	1	0	0.700
5	200	1.67	0.6	30	0.001559	128296.50	5	0.243	0.650	0.025	0.367
6	200	1.67	0.8	30	0.001017	196567.86	8.7	0.097	0.343	0.867	0.402
7	200	1.67	0.6	50	0.00281	71171.818	6.1	0.580	0.907	0.433	0.634
8	200	1.5	0.8	50	0.002164	92441.020	7.5	0.406	0.811	0.667	0.606
9	180	1.67	0.7	30	0.000659	272924.18	9.5	0	0	1	0.3
10	220	1.67	0.7	30	0.002502	87944.162	5	0.497	0.831	0.250	0.523
11	180	1.67	0.7	50	0.001286	139956.80	7.7	0.169	0.597	0.700	0.457
12	220	1.67	0.7	50	0.003247	67745.756	7.3	0.698	0.922	0.633	0.746
13	200	2	0.6	40	0.001244	160759.14	9	0.158	0.504	0.917	0.489
14	200	1.5	0.6	40	0.001345	148688.04	8.5	0.185	0.558	0.833	0.491
15	200	2	0.8	40	0.001226	163167.93	8.4	0.153	0.493	0.817	0.454
16	200	1.5	0.8	40	0.001397	143212.33	8.7	0.199	0.583	0.867	0.514
17	180	1.67	0.6	40	0.000957	188007.73	7.7	0.08	0.382	0.7	0.357
18	200	1.5	0.7	50	0.001656	120805.36	7.1	0.269	0.684	0.6	0.493
19	180	1.67	0.8	40	0.000902	199637.54	8	0.066	0.329	0.750	0.350
20	220	1.67	0.8	40	0.002359	93260.869	4	0.458	0.807	0.083	0.451
21	200	2	0.7	30	0.000739	270549.55	8.3	0.022	0.011	0.8	0.252
22	200	1.5	0.7	30	0.00151	132461.46	7.8	0.230	0.631	0.717	0.496
23	200	2	0.7	50	0.000995	201042.44	8.7	0.091	0.323	0.867	0.393
24	200	1.5	0.7	50	0.002849	70196.490	6.3	0.591	0.911	0.467	0.650
25	200	1.67	0.7	40	0.002086	95872.170	8.1	0.385	0.796	0.767	0.623
26	200	1.67	0.7	40	0.002436	82089.552	7.7	0.479	0.857	0.7	0.659
27	200	1.67	0.7	40	0.002016	99198.396	7.8	0.366	0.781	0.717	0.596
28	200	1.67	0.7	40	0.002019	99059.848	8.4	0.367	0.781	0.817	0.626
29	200	1.67	0.7	40	0.001936	103299.85	8.7	0.344	0.762	0.867	0.626

表3 二次响应面回归模型方差分析

Table 3 The quadratic response surface regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	0.69	8	0.086	14.50	<0.0001	**
A-干燥功率	0.29	1	0.29	48.83	<0.0001	**
B-脉冲比	0.10	1	0.1	17.43	0.0005	**
C-风速	0.000507	1	0.000507	0.086	0.7729	
D-初始含水率	0.16	1	0.16	27.42	<0.0001	**
A <sup>2</sup>	0.051	1	0.051	8.58	0.0083	**
B <sup>2</sup>	0.057	1	0.057	9.58	0.0057	**

转下页

接上页

C <sup>2</sup>	0.069	1	0.069	11.71	0.0027	**
D <sup>2</sup>	0.024	1	0.024	3.99	0.0594	
残差	0.12	20	0.005923			
失拟项	0.11	16	0.007177	7.91	0.0293	*
纯误差	0.00363	4	0.000907			

R<sup>2</sup>=0.81

注: \*\*, p<0.01 为差异极显著; \*, p<0.05 为差异显著。

## 2.2 枸杞微波间歇干燥工艺最优条件的设定

### 及模型验证

根据回归方程和拟合模型, 通过 Design-Expert 软件对实验数据进行二次响应面回归分析, 由此作出响应面图和等高线图(图 3~8) 每个响应面与等高线是对其中 2 个因素进行分析, 另外两个因素在零水平, 通过观察响应面图的形状可以直观反应各因素对响应值的影响<sup>[17]</sup>, 分析微波功率、脉冲比、风速和初始含水率对枸杞微波间歇干燥工艺综合得分 S 的影响, 并找到各影响因素在提取过程中相互影响关系, 在所在范围圈内存在极值, 即存在响应面最高点, 并总结规律得到枸杞微波间歇干燥最优工艺参数<sup>[18]</sup>。

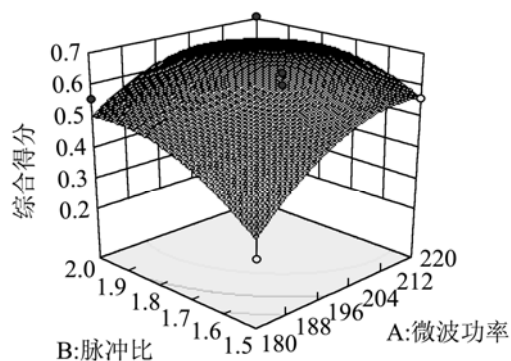


图3 风速为 0.7m/s 初始含水率40%时微波功率和脉冲比对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.3 Effects of microwave power and pulse ratio on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with wind speed of 0.7 m/s and initial moisture content of 40%**

由图 3 响应面图可知当风速为 0.7 m/s、初始含水率为 40%时, 脉冲比在 1.8 时, 微波功率为 210~216 W 左右达到响应面峰值, 该条件下综合得分达到极值。并且微波功率较低随着微波功率增大, 综合得分升高明显, 因此可得在功率小于 210 W 时随着功率升高综合品质得分显著升高, 在 210~216W 时综合得分到达峰值, 而脉冲比响应面曲线相对平缓, 由此验证前文所得结论微波功率的影响因素大于脉冲比影响因素。

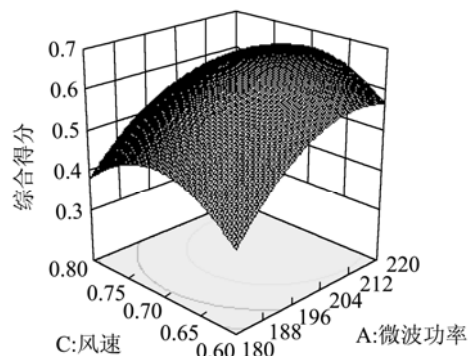


图4 脉冲比为1.67 初始含水率40%时微波功率和风速对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.4 Effects of the microwave power and wind speed on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with pulse ratio of 1.67 and initial moisture content of 40%**

由图 4 响应面图可知当脉冲比为 1.67、初始含水率为 40%时, 风速为 0.7 m/s, 微波功率在 210~216 W 之间会达到峰值, 在该条件下综合得分 S 达到极值。由图 3 中响应面图可知风速影响作用相对于微波功率较小, 当风速大于 0.7 m/s 时, 风速越大则综合得分越低, 并且风速越大单位质量能耗越大, 所以为了增大干燥速率降低干燥能耗不易采用较大得风速。

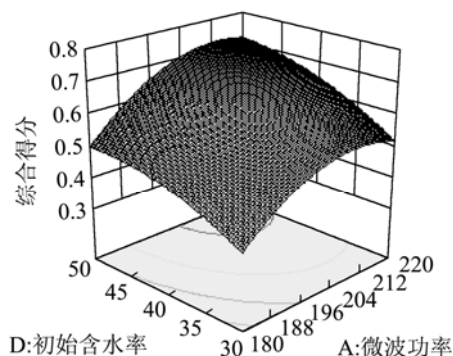


图5 脉冲比为 1.67 风速为 0.7 m/s 时微波功率和初始含水率对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.5 Effects of the microwave power and initial moisture content on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with pulse ratio of 1.67 and wind speed of 0.7 m/s**

由图 5 响应面图可知当脉冲比为 1.67、风速为 0.7 m/s, 初始含水率在 48%~50%, 微波功率在 210~216 W 之间会达到峰值, 且该条件下综合得分较高。由响应面图分析知初始含水率曲线相对微波功率曲线较平缓, 初始含水率的综合得分相对于微波功率对综合得分影响较小, 在 48%~50%左右时相对综合得分较高。

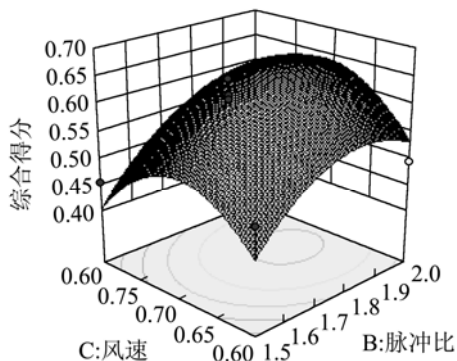


图 6 微波功率 200 W 初始含水率 40%时脉冲比和风速对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.6 Effects of the pulse ratio and wind speed on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with microwave power of 200 W and initial moisture content of 40%**

由图 6 响应面图得在微波功率 200 W、初始含水率为 40%, 风速为 0.7 m/s, 脉冲比为 1.8 左右时响应面图综合得分达到峰值, 由图 5 中脉冲比曲线与风速曲线对比可知, 脉冲比影响因素大于风速的影响因素。

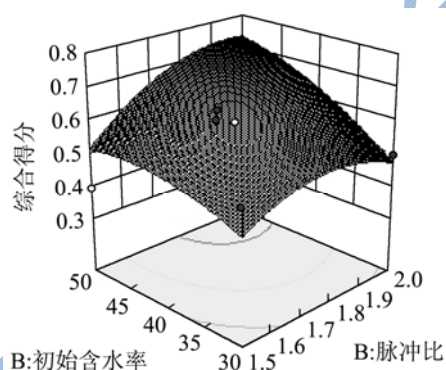


图 7 微波功率 200 W 风速为 0.7 m/s 时脉冲比和初始含水率对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.7 Effects of the pulse ratio and initial moisture content on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with microwave power of 200 W and wind speed of 0.7 m/s**

由图 7 响应面图可知在微波功率 200 W 时、风速为 0.7 m/s 时, 初始含水率 48%~50%时达到峰值, 脉冲比 1.8 时左右综合得分最高, 并对比脉冲比响应面曲线与初始含水率响应面曲线得知初始含水率影响因素大于脉冲比影响因素。

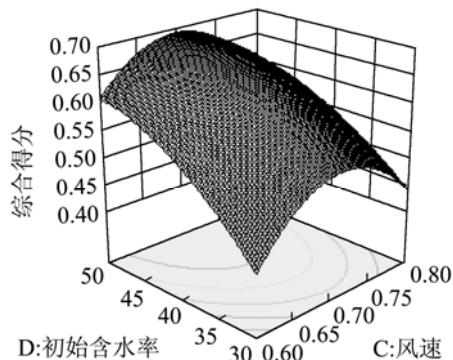


图 8 微波功率 200 W 脉冲比 1.67 时风速和初始含水率对枸杞微波间歇干燥综合得分的影响

**Fig.8 Effects of the wind speed and initial moisture content on the comprehensive scores of microwave intermittent drying of Chinese wolfberry with microwave power of 200 W and pulse ratio of 1.67**

由图 8 响应面图得在微波功率 200 W 时、脉冲比 1.67 时, 综合得分随着初始含水率降低而减小, 综合得分在风速为 0.7 m/s 时得分到达峰值, 并对比风速响应面曲线与初始含水率响应面曲线可知初始含水率影响因素大于风速影响因素。

综合图 3~8 可得枸杞微波间歇干燥在初始条件: 微波功率为 210~216 W, 脉冲比 1.8, 风速为 0.7 m/s, 初始含水率 48%~50%时综合品质得分相对较高。并且综合图 3~8 结论可验证各因素对枸杞微波间歇干燥综合因素影响的大小依次为: 干燥功率>初始含水率>脉冲比>风速。

### 2.3 工艺条件优化和验证试验

应用 Design-Expert 软件对回归方程模型 (式 8) 进行优化分析求解, 并且通过响应面图分析结论得到枸杞微波间歇干燥最优工艺参数: 微波功率为 210~216 W, 脉冲比为 1.8, 风速为 0.7 m/s, 初始含水率 48%~50%, 此时综合品质得分相对较高。

为了验证模型得可靠性, 采用上述最优工艺参数 (微波功率 210 W, 脉冲比 1.8, 风速 0.7 m/s, 初始含水率 50%) 进行试验验证, 试验验证结果综合得分为 0.785, 相比于 (表 2 试验设计及其结果) 最大值 0.746 较高。因此, 该工艺条件符合枸杞微波间歇干燥工艺要求, 且利用响应面法通过 Design-Expert 软件得到枸杞微波间歇干燥最优工艺参数真实可靠。

## 3 结论

3.1 根据响应面法进行枸杞微波间歇干燥试验结果得出, 各因素对枸杞微波间歇干燥综合因素影响的大小依次为: 干燥功率>初始含水率>脉冲比>风速。

3.2 通过响应面法建立了微波功率、脉冲比、风速、初始含水率的二次多项式回归方程,得到了枸杞微波间歇干燥得最佳干燥工艺参数。经过试验验证,微波功率 210~216 W,脉冲比 1.8,风速 0.7 m/s,初始含水率 48%~50%左右时时得到最大综合品质得分为 0.785,与理论预测值基本符合。因此,利用响应面法得到枸杞微波间歇干燥最优工艺参数真实可靠。

## 参考文献

- [1] 胡云峰,位锦锦,李苏宁,等.不同热风干燥温度对枸杞干燥特性的影响[J].食品与发酵工业,2017,10(1):130-134  
HU Yun-feng, WEI Jin-jin, LI Ning-ning, et al. Effects of different hot air drying temperature on characteristics of dried lycium barbarum [J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 10(1): 130-134
- [2] 刘志军,张璧光,李延军.马尾松微波间歇干燥对干燥效率与速率的影响[J].木材工业,2006,20(4):13-15  
LIU Zhi-jun, ZHANG Bi-guang, LI Yan-jun. Drying efficiency and rate for masson pine using an intermittent microwave drying method [J]. Wood Industry, 2006, 20(4):13-15
- [3] 张黎骅,张文,吕珍珍,等.响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J].农业工程学报,2011,27(3):369-374  
ZHANG Li-hua, ZHANG Wen, LV Zhen-zhen, et al. Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 369-374
- [4] 何自强,张惠玲,高永诚.响应面 Box-Behnken 设计优化超声波辅助法提取甘草总黄酮的工艺研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2016,43(4):66-72  
HE Zi-qiang, ZHANG Hui-ling, GAO Yong-cheng. Response surface Box-Behnken design optimization of licorice flavonoids extracted by ultrasonic assisted process study [J]. Journal of Beijing Chemical University (Natural Science Edition), 2016, 43(4): 66-72
- [5] Hongjie Pu, Zhenfeng Li, Ju Hui, et al. Effect of relative humidity on microwave drying of carrot [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 190: 167-175
- [6] 韩爱芝,白红进,耿会玲,等.响应面法优化超声辅助提取黑果枸杞叶片总黄酮的工艺研究[J].西北林学院学报,2013, 1:114-118,122  
HAN Ai-zhi, BAI Hong-jin, GENG Hui-ling, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of total flavonoids from lycium ruthenicum leaves by response surface methodology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 1: 114-118, 122
- [7] 郑国琦,包晗,杨涓,等.宁夏枸杞果实韧皮部及其周围细胞超微结构研究[J].西北植物学报,2015,35(11):2211-2218  
ZHENG Guo-qi, BAO Han, YANG Juan, et al. Ningxia wolfberry fruit phloem and the surrounding cell ultrastructure study [J]. Journal of Northwest Plants, 2015, 35(11): 2211-2218
- [8] 冯云,李汴生,周厚源,等.微波间歇处理对肉鸡翅根干燥特性及品质的影响[J].食品与发酵工业,2014,40(10):69-75  
FENG Yun, LI Bian-sheng, ZHOU Hou-yuan, et al. Effects of intermittent microwave preprocess on drying properties and quality of broiler chicken wings [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(10): 69-75
- [9] Jun Wang, Yong-Sen Xiong, Yong Yu. Microwavedrying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato [J]. European Food Research and Technology, 2004, 219(5): 500-506
- [10] 朱德泉.微波干燥条件对小麦干后品质和能耗的影响[A].中国农业机械学会.走中国特色农业机械化道路-中国农业机械学会 2008 年学术年会论文集(下册)[C].中国农业机械学会:,2008:3  
ZHU De-quan. After working quality and energy consumption of microwave drying conditions on the wheat [A]. The influence of the Chinese society of agricultural machinery. The road of agricultural mechanization with Chinese characteristics, Chinese society of agricultural machinery in 2008 academic essays (part ii) [C]. : at the Chinese academy of agricultural machinery, 2008:3
- [11] 郭晓霞,余学龙,应铁进.速泡银耳粒高压蒸制工艺的响应面优化[J].中国食品学报,2013,13(7):135-143  
GUO Xiao-xia, YU Xue-long, YING Tie-jin. Optimizing high pressure steaming process for instant tremella production by response surface methodology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13 (7): 135-143
- [12] Suzan Tireki, Gülüm Şumnu, Ali Esin. Production of bread crumbs by infrared-assisted microwave drying [J]. European Food Research and Technology, 2006, 222(1-2): 8-14
- [13] 张江宁,张宝林,丁卫英,等.响应面法优化红枣片真空干燥工艺[J].食品工业,2015,4:154-158  
ZHANG Jiang-ning, ZHANG Bao-lin, DING Wei-ying, et al. Optimization of vacuum drying for jujube slice by response surface methodology [J]. The Food Industry, 2015, 4: 154-158

- [14] 孙媛,谢超,何韩炼.响应面法优化热泵-热风联合干燥小黄鱼的节能参数[J].海洋与湖沼,2013,44(5):1257-1262  
SUN Yuan, XIE Chao, HE Han-lian. The response surface method optimization of energy-saving heat pump - hot air drying polyactis parameters [J]. Journal of Marine and Limnetic, 2013, 44(5): 1257-1262
- [15] Yang P, Fang M, Liu Y W. Optimization of a phase adjuster in athermo-acoustic stirling engine using response surface methodology [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1772-1775
- [16] 杨文雄,高彦祥.响应面法及其在食品工业中的应用[J].中国食品添加剂,2005,2:68-71  
YANG Wen-xiong, GAO Yan-xiang. Response surface methodology & its application in food industry [J]. China Food Additives, 2005, 2: 68-71
- [17] 张丽晶,林向阳,彭树美,等.响应面法优化绿茶微波真空干燥工艺条件[J].食品科学,2009,30(22):122-125  
ZHANG Li-jing, LIN Xiang-yang, PENG Shu-mei, et al. Microwave-vacuum drying of green tea leaves [J]. The Food Industry, 2009, 30(22): 122-125
- [18] 王永菲,王成国.响应面法的理论与应用[J].中央民族大学学报(自然科学版),2005,14(3):236-240  
WANG Yong-fei, WANG Cheng-guo. The theory and application of the response surface method [J]. Journal of Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2005, 14(3): 236-240