

模糊数学评价结合响应面法 优化红枣脆片真空干燥工艺

王彩霞,买玉花,贺晓光*,王松磊,李 秀,王素也

(宁夏大学农学院,宁夏银川 750021)

摘要:以红枣切片为原料、模糊数学感官评分为指标,在单因素实验的基础上,选择物料厚度、真空度、干燥温度为自变量,利用响应面法对红枣脆片真空干燥工艺进行优化。结果表明:以感官评定为基础,对真空干燥红枣脆片的品质进行权重分析,得到权重集 $K = (\text{色泽} 0.20, \text{形状} 0.14, \text{滋气味} 0.26, \text{酥脆度} 0.40)$ 。通过响应面分析得到红枣脆片真空干燥的最佳工艺条件为:物料厚度 3 mm、真空度 0.08 MPa、干燥温度 60 °C,在此条件下得到产品的感官评分为 91.68 分,产品色泽均匀、外形平整,枣香浓郁,酥脆可口。模糊数学评价与响应面法相结合用于红枣脆片真空干燥工艺条件的优化切实可行。与传统热风干燥方式相比较,真空干燥后的产品品质更佳。

关键词:红枣脆片,真空干燥,模糊数学评价,响应面法

Technology Optimization of Jujube Chips by Vacuum Drying Technology based on Fuzzy Mathematics Evaluation Combined with Response Surface Method

WANG Cai-xia, MAI Yu-hua, HE Xiao-guang*, WANG Song-lei, LI Xiu, WANG Su-ye

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Taking jujube chips as the raw materials, the fuzzy mathematics sensory evaluation as the index, single factor experiment, material thickness, vacuum degree, drying temperature were selected as independent variables and the vacuum drying technology was optimized by response surface methodology. The results showed that weight analysis for vacuum dried jujube chips was based on sensory evaluation and the weight collection was $K = (\text{color} 0.20, \text{shape} 0.14, \text{flavor} 0.26, \text{crisp degree} 0.40)$. Through response surface analysis, the optimal conditions were as follows: Material thickness 3 mm, vacuum degree 0.08 MPa and drying temperature 60 °C. Under this condition, sensory score was 91.68. The product had uniform color, complete shape, rich flavor, crisp and delicious. The application of the combining fuzzy mathematics and response surface method in the optimized technology of jujube chips by vacuum drying technology was feasible. In addition, compared with the traditional hot air drying, the product quality of vacuum drying would be better.

Key words: jujube chips; vacuum drying; fuzzy mathematics evaluation; response surface method

中图分类号: TS205.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2018)21-0164-08

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.030

引文格式:王彩霞,买玉花,贺晓光,等.模糊数学评价结合响应面法优化红枣脆片真空干燥工艺[J].食品工业科技, 2018, 39(21):164-171.

红枣(*Zizyphuo jujube* Miller),又名大枣,为鼠李科植物枣的干燥成熟果实,主产于我国山东、河北、山西、陕西、新疆等地,产量约占世界总产量的99%^[1],具有很高的商业价值。红枣中含有丰富的多糖^[2]、黄酮^[3]、生物碱^[4]、环核苷酸^[5]、酚类^[6]、维生素等有益于人体健康的化合物,所含的维生素C居栽培水果之首^[7]。同时富含多种微量元素和生物活性成分,具有补血安神、养脾护肝等滋补保健作用,是

一种天然的药食同源产品^[8]。但红枣是含水量非常高的季节性水果,采摘后极易腐烂变质。故除少量枣果用于鲜食外,大部分被制成半干枣后贮藏并销售,产品形式单一^[9]。因此,开发生产红枣脆片可以有有效的拓宽消费市场。真空干燥是一种低温低压的无氧干燥方法,能较好的保留产品原有的营养成分,因此,在农产品加工中的关注度越来越高^[10-12]。

食品的感官评价在食品加工评价体系中具有至

收稿日期:2018-01-24

作者简介:王彩霞(1994-),女,硕士研究生,研究方向:农产品无损检测,E-mail:18295671639@163.com。

*通讯作者:贺晓光(1963-),男,本科,教授,主要从事食品加工与食品机械方面的教学和科研工作,E-mail:13995015705@163.com。

基金项目:中央财政支持地方高校改革发展资金——食品学科建设项目(2017);2018年度自治区级大学生创新创业训练项目(201810749059)。

关重要的作用,但容易受到品评人员主观因素的影响,从而很难做出准确的评价。模糊综合评判法是借助模糊数学的一些概念,应用模糊关系合成原理,综合考虑各个因素对整体效果的影响,进而对产品的品质做出客观、准确的评价^[13]。已有学者用模糊评定法优化了红枣渣-小麦混合粉^[14]、紫薯^[15]等的干燥工艺,评价双孢菇^[16]、石榴果粉^[17]、花茶^[18]等的干燥品质。目前,对红枣脆片的模糊评价方法尚未见报道。

本文采用真空干燥技术对红枣切片进行干燥,通过单因素实验,确定实验因素的取值范围和编码水平;利用模糊数学法计算出真空干燥后红枣脆片的综合感官评分,以模糊综合评分 Y 为响应值,通过响应面分析,优化出真空干燥红枣脆片的最佳工艺条件。同时,与传统的热风干燥方法进行对比分析,旨在开发一种营养美味、方便即食的红枣休闲食品,为红枣的深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

半干红枣 中国新疆和田红枣产业基地;纯净水 杭州娃哈哈集团有限公司。

DZF-6050 型真空干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;2XZ-2 型旋片式真空泵 临海市谭氏真空设备有限公司;DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;WY-105W 型卤素快速水分测定仪 上海婉源电子科技有限公司;TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司;CR-400 型自动色差仪 上海图新电子科技有限公司;AL204 型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程 原料挑选→清洗→去核→切片→整形→干燥→冷却→包装→检验

选择色泽均匀,大小相当,无损伤无霉变的半干红枣(初始含水率为 19.91%,以干基计),清洗,沥干,去核后切成一定厚度的圆片,分别在不同的真空度和温度条件下进行干燥。每次称取(300±5)g 枣片,干燥至含水率≤5%时,停止干燥,取出样品,待冷却后装入聚乙烯塑料袋中密封保存,24 h 后测定其感官指标。

1.2.2 单因素实验设计 以红枣脆片的感官评分为指标,分别对影响真空干燥红枣脆片品质的物料厚度、真空度和干燥温度 3 个主要因素进行实验条件初选,每个因素取 5 个水平。物料厚度为:1、2、3、4、5 mm,控制真空度为 0.08 MPa、干燥温度 60℃;真空度为:0.05、0.06、0.07、0.08、0.09 MPa,控制物料厚度 3 mm、干燥温度 60℃;干燥温度为 40、50、60、70、80℃,控制物料厚度为 3 mm,真空度 0.08 MPa。

为了直观表示各因素对红枣脆片品质的影响,也为了能够快速、简单、较准确地获得各因素的较优水平,单因素实验中感官评分标准参照朱由珍^[19]的方法。实验中以样品的加权平均得分 X_j 为指标,对试验参数进行初级筛选。 $X_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_{i1}f_1 + x_{i2}f_2 + x_{i3}f_3$

$+ x_{i4}f_4)$,其中 X_j 表示第 j 个样品的加权平均得分; $j = 1, 2, 3, 4, 5$ 为某干燥因素下的样品号; $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ 为评价员编号; $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}$ 为第 i 个评价人员对色泽、形状、滋气味、口感 4 个评价指标的评分(评分标准见表 2); f_1, f_2, f_3, f_4 为 4 个评价指标对应的权重因子。

1.2.3 响应面试验设计 在单因素试验基础上,采用 Box-Behnken 中心组合实验设计原理,选取物料厚度(A)、真空度(B)、干燥温度(C)3 个试验因素,以感官评分(Y)为响应值,设计响应面实验,如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels used in response surface design

编码值	因素		
	A 物料厚度 (mm)	B 真空度 (MPa)	C 干燥温度 (℃)
1	3	0.07	50
0	4	0.08	60
-1	5	0.09	70

1.2.4 热风干燥工艺 热风干燥过程参考罗东升^[20]的方法,设置实验参数为:物料厚度 3 mm 干燥温度 60℃,风速 2.5 m/s,物料量(300±5)g,干燥至含水率≤5%时,结束干燥。24 h 后进行指标测定。

1.2.5 指标测定方法

1.2.5.1 硬、脆度的测定 采用质构仪测定,测定条件为:测试前速度 1.0 mm/s,测试速度 0.2 mm/s,测试后速度 1.0 mm/s,测试距离 2.0 mm,探头型号:P/5。硬度结果用曲线内面积表示,线性距离为样品的酥脆性。各样本均测定 10 次,剔除最大值和最小值后计算平均值即可得到最终的硬度与脆度值。

1.2.5.2 色泽的测定 以仪器白板色泽为标准,测定红枣脆片的明度指数 L^* 、彩度指数 a^* 和 b^* 。 L^* 、 a^* 、 b^* 表色系还可以表示两种色调之间的差值,即色差,可用 ΔE 表示^[21]。 ΔE 按式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2} \quad \text{式(1)}$$

式中, L^* 、 a^* 、 b^* 为标准白板的测定值, L 、 a 、 b 为干燥后样品测定值。

每个样品用色彩色差计进行 3 次色泽测定,记录明度指数 L^* 、彩度指数 a^* 、 b^* 值,并计算 ΔE 值,最后取平均值,以此反映干燥产品色泽的变化。

1.2.5.3 含水率的测定 实验采用 WY-105W 型卤素快速水分测定仪测定干燥后红枣脆片的水分含量,其检测原理与传统烘箱干燥法相同,根据物料干燥前后的质量变化来计算水分含量,红枣脆片水分计算如式(2)所示。

$$W(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中, M_1 表示烘干前样品的质量,g; M_2 表示烘干后样品的质量,g。

1.2.5.4 复水性的测定 根据 Huang 等^[22]的方法略做改变,称取 2.0 g 干燥后的枣片样于 100 mL 三角瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,每隔 30 min 取出,用滤纸吸

表2 红枣脆片感官评定表

Table 2 Sensory evaluation table of jujube chips

等级	色泽	形状	滋气味	口感
v ₁	具有枣本身的香味,味道较浓	外表平整,饱满	果皮红亮,果肉金黄	口感酥脆、硬度适中
v ₂	具有枣本身的香味	外表较平整,较饱满	果皮红色,果肉黄色	口感较酥脆、硬度较大
v ₃	具有枣本身的香味,味道清淡	外表较平整,有皱缩	果皮暗红,果肉棕黄	较柔软,不酥脆、硬度较小
v ₄	不具有枣香味	外表不平整,皱缩较严重	果皮红褐色,果肉暗黄	柔软不酥脆、硬度小
v ₅	无枣香味,有焦糊味或其他异味	外表弯曲,皱缩严重	果皮褐色,果肉暗黄	很柔软、硬度很小

干表面水分后称量。直至枣片质量不在增加,沥干后称重。复水比 R 按照公式(3)计算。

$$R = \frac{W_w}{W_d} \quad \text{式(3)}$$

式中,R 表示复水比,W_w 为复水后枣片的质量,g;W_d 为复水前枣片的质量,g。

1.2.6 模糊数学评价方法

1.2.6.1 建立感官评定小组 参照 Sallam^[23]的方法,选择经过感官评价培训的 10 人(5 男 5 女)组成评价小组,对干燥后的红枣脆片的色泽、形状、滋气味、口感 4 个因素进行感官评价,并做出评分。要求品评人员在评定前 12 h 内禁止吸烟、喝酒,禁食刺激性食物。评定过程中不能沟通、交流。评定结束后,收集评分表,并进行统计分析。

1.2.6.2 因素集的确立 因素集是指影响被评判对象的指标集合。对于红枣脆片,确定感官质量指标集 U = (u₁, u₂, u₃, u₄)。其中 u₁、u₂、u₃、u₄ 分别表示色泽、形状、滋气味、口感。

1.2.6.3 评语集的确立 评语集是指参评人员对评价指标反馈信息的集合。本实验中红枣脆片的评语集 V = (v₁, v₂, v₃, v₄, v₅)。其中 v₁、v₂、v₃、v₄、v₅ 分别表示很好、好、一般、差、很差。感官评定表如表 2 所示。

1.2.6.4 权重集的确立 权重集就是各项指标权重系数的集合,表示各指标在总体感官品质中所占的比重。本实验采用用户调查法来确定权重^[24],请 10 位品评人员对红枣脆片的色泽、形状、滋气味、口感 4 个因素在所有因素中所占重要性程度的比率进行分析评价并打分。

1.2.6.5 模糊矩阵的建立 10 名感官评定人员根据评语集 V 对每一个产品的色泽、形状、滋气味、口感 4 个因素逐一进行评价,统计各因素所得评语的次数,绘制成表。将表中各因素所得评语次数除以人数 10,得到 4 个因素对 4 项评语的隶属度。最后根据模糊变换原理,对每一个被评价的因素建立一个从 U 到 V 模糊矩阵 A_j,得到每个产品的综合评价结果。

$$A_j = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & r_{i3} & r_{i4} & r_{i5} \end{pmatrix}$$

式中,j=1,2,3,4 为样品编号;i=1,2,3,4,5 为质量评价因素;r₁₁、r₁₂、r₁₃、r₁₄、r₁₅ 分别为第 i 个评价因素对各项评语的隶属度。计算结果为 B, B = X · A, 其中

X 为权重集,B 为模糊矩阵。

1.2.6.6 综合评分计算 将模糊向量单值化进行比较排序,设定很好 100 分、好 80 分、一般 60 分、差 40 分、很差 20 分^[25]。将综合评定结果集中各个量分别乘以其对应的分值后进行加和,最后得出每个产品的综合评分。

1.3 数据统计及分析

采用 Design - Expert 8.0.6 进行响应面分析, Origin 8.5 和 SAS 9.2 进行统计分析。所有数据重复测定三次,计算平均值,结果用“平均值 ± 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 物料厚度对红枣脆片感官品质的影响 不同物料厚度对红枣脆片感官评分的影响见图 1。随着物料厚度的增加,感官评分呈现先增加后降低的趋势,在厚度为 3 mm 时,感官评分最高。若物料过厚,则热量在传递过程中所受的阻力增大,从而使热量在物料内部传导时的损耗增多。物料中心部位获得的热量减少,容易使产品因干燥不均匀而在表面形成褶皱。同时,内部水分向物料表面迁移的路径增长,干燥时间增加,导致干燥后的枣片湿软不酥脆,并且色泽不均,香味不明显,感官评分降低。随着物料厚度的减小,热量在物料中的传递速率增加,物料内部的水分大量逸出,形成许多微孔结构^[26],得到的产品酥脆可口。若物料较薄,则热量传递速率过快,容易造成表面组织硬化,影响产品的形状,同时,使产品硬度增大。因此,选择物料厚度 3~5 mm 进行优化。

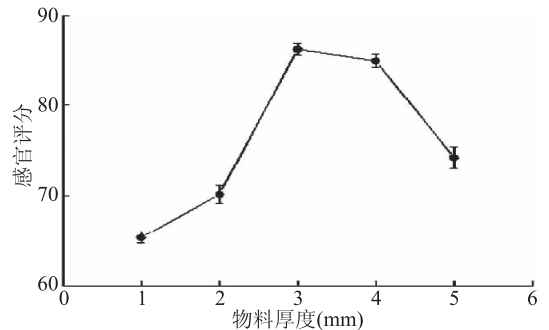


图1 物料厚度对红枣脆片感官评分的影响

Fig.1 Effect of material thickness on sensory score of jujube chips

2.1.2 真空度对红枣脆片感官品质的影响 不同真空度对红枣脆片感官评分的影响见图 2。

由图 2 可知,在干燥温度和物料厚度一定的情

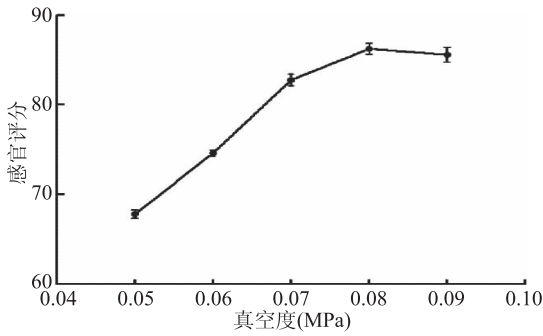


图2 真空度对红枣脆片感官评分的影响

Fig.2 Effect of vacuum degree on sensory score of jujube chips

况下,感官评分随着真空度的增大而增大。根据克拉佩龙-克劳修斯方程,真空度越高,水的沸点越低,越容易挥发和扩散,因此高的真空度可以减少干燥所用时间,提高产品的酥脆度,感官评分升高。但当真空度超过 0.08 MPa,过高的真空度会引起干燥室内电弧放电^[27],导致局部过热对产品造成不可逆的损害,使红枣脆片表面产生焦糊,导致感官评分降低,因此应该选择 0.08 MPa 及以上的真空度来进行干燥。

2.1.3 干燥温度对红枣脆片感官品质的影响 不同干燥温度对红枣脆片感官品质的影响见图 3。从图 3 可以看出,干燥温度对红枣脆片感官品质有明显的影响。随着温度的增加,产品的脆度也逐渐增大,感官评分上升。这是因为干燥温度越高,物料和干燥介质之间的温度梯度越大,物料内部水分子获得的动能越大,传热和传质速率加快,达到安全含水率的时间缩短,容易形成浓郁的枣香味和酥脆感。所以感官评分升高。60 °C 时感官评分达到最高。在 70 °C 时,红枣脆片表面呈现较浅的褐色,略有焦糊味,使产品感官评分降低。因为当温度过高时,枣片内部水分迁移速率小于表面汽化速率,继续加热导致表面变干严重甚至产生裂纹,出现“皮焦里生”的情况,使枣片表面颜色加深^[28]。故干燥温度不能超过 70 °C。同样温度太低使得内扩散作用大于外扩散作用,造成枣片内部水汽不易散出,水分蒸发速度减缓,红枣脆片湿软、不酥脆,同时,色泽不均、枣香不明显。因此,选取 50~70 °C 进行优化。

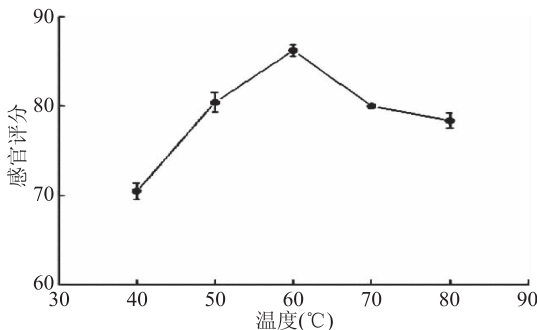


图3 干燥温度对红枣脆片感官评分的影响

Fig.3 Effect of drying temperature sensory score of jujube chips

2.2 模糊数学感官评价

2.2.1 红枣脆片感官评定指标权重确定 红枣脆片

感官评价指标权重统计结果见表 3。从表 3 中可以看出,最终确立各向量的权重集 $X = (x_1, x_2, x_3, x_4) = (0.20, 0.14, 0.26, 0.40)$ 。

表3 红枣脆片质量因素的权重分布统计(分)

Table 3 Weight distribution and statistics of jujube chips' quality factor(scores)

编号	色泽	形状	滋气味	口感
1	1	2	1	6
2	3	1	2	4
3	2	1	2	5
4	2	1	2	5
5	2	1	3	4
6	3	2	3	2
7	2	2	3	3
8	3	1	4	2
9	2	2	2	4
10	1	1	3	5
总分	20	14	26	40

2.2.2 模糊数学评定 根据响应面试验方案的设计,制作出相应的 17 组产品。10 位感官评定人员分别对产品的色泽、形状、滋气味和口感 4 个方面进行感官评价,评价标准见表 2。产品的具体评定结果见表 4。

将表 4 中各质量因素不同等级得票数除以评定人数(10 人),得到模糊矩阵 $A_1 \sim A_{17}$ 。以表 4 的 1 号样品为例,对红枣脆片色泽的评价结果中有 5 人认为很好,4 人认为较好,1 人认为一般,0 人认为较差,0 人认为很差,将 1 号样品各指标每个等级的评定人数除以参与评定的总人数,即得 1 号样品的模糊评价关系矩阵 A_1 。

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix}$$

同理可得到 $A_2 \sim A_{17}$ 。

2.2.3 模糊变换及综合评价 根据模糊变换原理 $B = X \cdot A$,则对第 j 号样品评价结果为 $B_j = X \cdot A_j$,第 1 组样品的综合评定结果为:

$$B_1 = X \cdot A_1 = (0.20, 0.14, 0, 26, 0, 40) \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix} = (0.514, 0.294, 0.1920, 0, 0)$$

由以上结果可以看出,在第一种工艺条件下所干燥出的红枣脆片有 51.4% 的评定人员认为很好,29.4% 的人认为好,19.2% 的人认为一般。同理可得其他样品感官评分结果:

$$B_2 = (0.374, 0.240, 0.266, 0.100, 0.020),$$

$$B_3 = (0.474, 0.354, 0.172, 0, 0),$$

$$B_4 = (0.440, 0.306, 0.188, 0.066, 0),$$

$$B_5 = (0.200, 0.240, 0.300, 0.226, 0.034),$$

表4 红枣脆片感官评定票数分布
Table 4 Vote distribution of sensory evaluation of jujube chips

序号	色泽					形状					滋气味					口感				
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
1	5	4	1	0	0	6	3	1	0	0	5	2	3	0	0	5	3	2	0	0
2	4	2	2	1	1	3	3	3	1	0	2	3	4	1	0	5	2	2	1	0
3	5	3	2	0	0	4	5	1	0	0	3	4	3	0	0	6	3	1	0	0
4	4	2	2	2	0	4	2	4	0	0	4	3	2	1	0	5	4	1	0	0
5	2	2	3	2	1	2	2	3	2	1	2	2	3	3	0	2	3	3	2	0
6	5	3	2	0	0	4	4	2	0	0	3	3	4	0	0	6	3	1	0	0
7	7	2	1	0	0	5	5	0	0	0	6	4	0	0	0	5	4	1	0	0
8	7	2	1	0	0	5	3	2	0	0	5	2	3	0	0	5	4	1	0	0
9	7	1	2	0	0	6	3	1	0	0	3	4	3	0	0	5	3	2	0	0
10	0	3	4	3	0	3	3	3	0	1	3	3	2	0	2	3	3	2	1	1
11	4	3	2	1	0	5	3	1	1	0	5	3	2	0	0	4	3	3	0	0
12	1	2	2	2	3	1	3	3	2	1	0	3	3	2	2	2	3	3	1	1
13	1	2	2	2	3	0	3	4	2	1	1	3	3	1	2	2	3	3	1	1
14	2	2	4	2	0	1	3	3	3	0	1	3	5	1	0	2	1	6	1	0
15	6	3	1	0	0	5	2	2	1	0	6	4	0	0	0	6	1	1	2	0
16	2	2	2	2	2	3	3	1	2	1	3	3	1	1	2	2	3	3	1	1
17	1	2	2	2	3	1	3	1	3	2	3	3	2	2	0	3	3	2	2	0

注: V₁:很好; V₂:好; V₃:一般; V₄:差; V₅:很差。

$B_6 = (0.474, 0.314, 0.212, 0, 0)$,
 $B_7 = (0.566, 0.374, 0.600, 0, 0)$,
 $B_8 = (0.540, 0.294, 0.166, 0, 0)$,
 $B_9 = (0.502, 0.286, 0.212, 0, 0)$,
 $B_{10} = (0.240, 0.300, 0.254, 0.100, 0.106)$,
 $B_{11} = (0.440, 0.300, 0.226, 0.034, 0)$,
 $B_{12} = (0.240, 0.300, 0.254, 0.100, 0.106)$,
 $B_{13} = (0.126, 0.280, 0.294, 0.134, 0.166)$,
 $B_{14} = (0.394, 0.420, 0.186, 0, 0)$,
 $B_{15} = (0.586, 0.232, 0.088, 0.094, 0)$,
 $B_{16} = (0.240, 0.280, 0.200, 0.134, 0.146)$,
 $B_{17} = (0.240, 0.300, 0.254, 0.100, 0.106)$ 。

将综合评定结果中各个量分别乘以其对应的分值, 并进行加和, 得到每个产品的最后总分, 结果见表5。

2.3 响应面优化试验

2.3.1 响应面实验结果与分析 利用 Design-Expert 8.0.6 软件对模糊综合评价结果进行二次回归拟合分析, 得到多元二次回归方程:

$$Y = 86.28 - 9.95A - 3.54B + 4.14C - 0.84AB - 1.89AC - 3.20BC - 5.08A^2 - 7.31B^2 - 7.37C^2$$

对模型进行显著性验证结果见表6。回归方差分析显著性检验表明, 该回归模型 $F = 98.33$, $p < 0.0001 < 0.01$, 模型回归极显著。同时, 失拟项 $p = 0.0649 > 0.05$, 模型不显著, 表示模型预测值与实际值拟合程度高。回归系数 $R^2 = 0.9922$, 调整决定系数 $R^2_{adj} = 0.9821$ 。说明模型与试验拟合程度高, 可用该模型对真空干燥后的红枣脆片的感官评分进行分析和预测。

从表5可以看出, 物料厚度、真空度、干燥温度

表5 响应面实验方案及结果

Table 5 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	A	B	C	感官评分(分)
1	0	0	0	86.4
2	-1	0	-1	77.0
3	0	0	0	86.0
4	-1	1	0	82.4
5	1	0	1	66.9
6	0	0	0	85.2
7	-1	0	1	90.1
8	0	0	0	87.5
9	-1	-1	0	85.8
10	0	-1	-1	69.4
11	0	-1	1	82.9
12	1	1	0	60.3
13	1	0	-1	61.3
14	0	1	1	67.4
15	0	0	0	86.2
16	0	1	-1	66.7
17	1	-1	0	67.1

对感官评分的影响均呈极显著。同时, 除 AB 项之外各因素的交互作用对感官评分均有显著影响。因素 F 值的大小反映出其对试验指标的重要性, F 值越大, 表明对试验指标影响越大^[29]。对各因素的影响程度进行分析可知, 影响红枣脆片感官评分因素主次排列顺序为: 物料厚度 > 干燥温度 > 真空度。

2.3.2 因素间的交互作用分析 响应面曲线图是由响应值与任意两个试验因素构成的三维曲面图, 可

表6 回归模型的方差分析
Table 6 Variance analysis of the fitted regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	Pr > F	显著性
模型	1713.79	9	190.42	98.33	<0.0001	**
A	792.82	1	792.82	409.40	<0.0001	**
B	100.25	1	100.25	51.77	0.0002	**
C	136.79	1	136.79	70.64	<0.0001	**
AB	2.82	1	2.82	1.46	0.2665	
AC	14.29	1	14.29	7.38	0.0299	*
BC	40.96	1	40.96	25.15	0.0025	**
A ²	108.44	1	108.44	56.00	0.0001	**
B ²	224.69	1	224.69	116.03	<0.0001	**
C ²	229.01	1	229.01	118.26	<0.0001	**
残差	13.56	7	1.94			
失拟项	10.94	3	3.65	5.59	0.0649	
纯误差	2.61	4	0.65			
总和	1727.34	16				
	$R^2 = 0.9922$	$R^2_{Adj} = 0.9821$				

注: * 为 $p < 0.05$, 具有显著性; ** 为 $p < 0.01$, 具有极显著性。

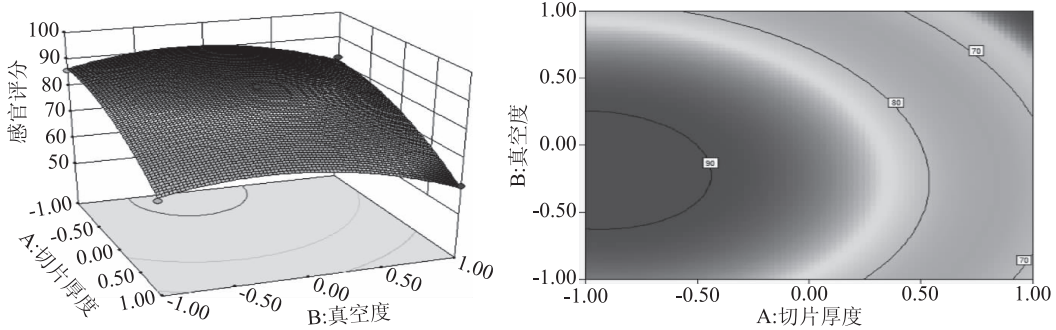


图4 物料厚度与真空度对红枣脆片感官评分响应面图与等高线图

Fig.4 Material thickness and vacuum degree on the sensory score of jujube chips' of response surface and contour plot

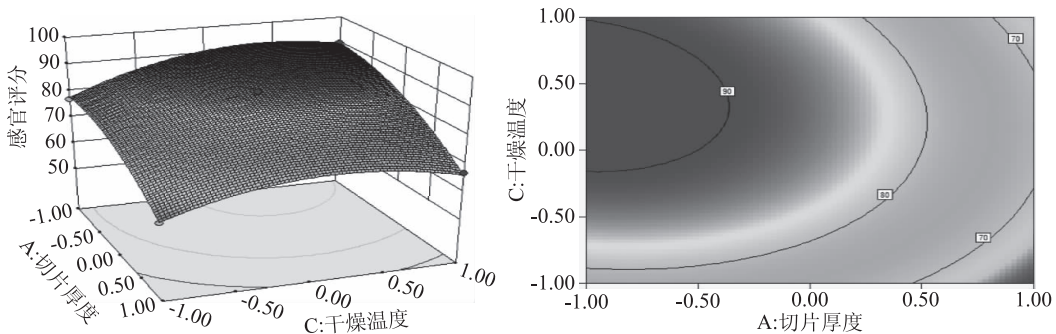


图5 物料厚度与干燥温度对红枣脆片感官评分响应面图与等高线图

Fig.5 Material thickness and drying temperature on the sensory score of jujube chips' of response surface and contour plot

通过每个曲面的弯曲弧度来判断各因素之间的交互作用,弯曲程度越大说明交互作用越强^[30]。等高线则反映了两个因素交互作用的显著程度,越接近圆形交互作用越不明显。图4~图6反映了物料厚度、真空度和干燥温度三个试验因素以感官评分为响应值的曲线图。

由图4~图6的响应面图可知,图6中曲线弯曲程度最大,说明干燥温度与真空度的交互作用最强。图4曲线最为平缓,表明物料厚度和真空度的交互作用最不明显。由等高线图可知,图6形状更接近

椭圆,所以,干燥温度与真空度的交互作用对感官评分的影响个最显著($p < 0.01$)。同时,由图6可以看出,真空度取值较低时,随着干燥温度的升高,感官评分逐渐升高。当真空度较大时,干燥温度越高,感官评分越低,说明两因素在一定水平上有交互作用。由图5可知,当物料厚度一定时,随着干燥温度的升高,感官评分先升高后降低,其主要原因是随着干燥温度的升高,产品表面由于水分流失过快形变严重,同时,高温使枣片表面出现局部焦糊现象,影响产品外形及口感,使感官评分降低。

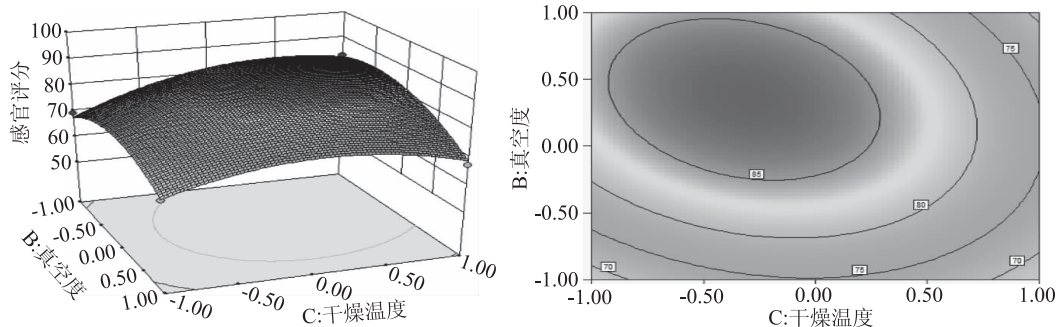


图6 真空度与干燥温度对红枣脆片感官评分响应面图与等高线图

Fig.6 Vacuum degree and drying temperature on the sensory score of jujube chips' of response surface and contour plot

2.4 验证试验

通过数学模型对半干红枣脆片真空干燥工艺进行优化,分析获得最佳工艺配方为物料厚度 3 mm,真空度 0.08 MPa,干燥温度 64.72 °C,预测感官评分最终得分为 92.98 分。为了便于实际操作,将工艺参数修正为物料厚度 3 mm,真空度 0.08 MPa,干燥温度 60 °C。在优化条件下进行 3 次重复验证实验,感官评价平均得分为 (91.68 ± 1.41) 分,与模型预测值基本相符,说明该模型与实际情况较为拟合,优化所得的工艺参数合理、可靠,具有实用价值。

2.5 真空干燥法与传统热风干燥法比较

利用优化后的红枣脆片真空干燥工艺与传统热风干燥方式进行比较。对比最终产品的含水率、色泽、质构及感官评分,结果如表 7 所示。可以看出,真空干燥后的红枣脆片硬度高于热风干燥后枣片的硬度,两种干燥方式下真空干燥能获得更好的产品色泽。同时,真空干燥条件下枣片的含水率、复水性、感官评分等明显优于热风干燥。原因是热风干燥过程中,温度从外部向枣片中心传递,从而使枣片表面温度远远高于内部,同时,内部水分未能及时转移到枣片表面,枣片组织细胞迅速收缩,从而在表面形成一层干硬膜,表面出现裂纹和褶皱。硬度低,但是外形及滋味较差,影响感官评分。真空干燥是在低压无氧条件下进行干燥,在相同的时间内能达到更低的含水率,色泽更加均匀,质地更酥脆,感官评分也更高。这与李宝玉^[31]等人对香蕉的品质研究结果相一致。

表7 不同干燥方式下红枣脆片的品质

Table 7 The quality of jujube chips in different drying ways

指标	真空干燥	热风干燥	
硬度(g)	26373.90 ± 797.46 ^a	13912.93 ± 485.83 ^b	
脆度	11132.92 ± 304.16 ^b	21623.25 ± 105.93 ^a	
色泽	L^*	45.84 ± 0.21 ^b	46.40 ± 0.12 ^a
	a^*	6.37 ± 0.11 ^b	6.69 ± 0.09 ^a
	b^*	24.51 ± 0.55 ^b	25.86 ± 0.09 ^a
	ΔE	51.26 ± 0.07 ^a	52.36 ± 0.40 ^a
	含水率(%)	4.27 ± 0.06 ^b	5.70 ± 0.21 ^a
复水比	2.03 ± 0.07 ^a	1.68 ± 0.02 ^b	
感官评分(分)	90.76 ± 0.29	87.35 ± 0.49 ^b	

注:同行字母不同代表数据间显著性差异,即 $p < 0.05$ 。

3 结论

利用模糊数学感官评价法对真空干燥的半干红枣脆片进行感官评价,得到色泽、形状、滋味、口感 4 评价因素的权重分别为 0.20、0.14、0.26、0.40,解决了在感官评价中各种指标的评分差异以及感官评价人员之间主观差异的复问题,增强了评价结果的可靠性和客观性。同时,结合响应面分析法对半干红枣脆片真空干燥工艺进行优化,建立了红枣脆片感官评定结果与物料厚度、真空度、干燥温度的二次多项回归方程,并对回归模型进行分析,得出物料厚度是影响红枣脆片感官评分的最关键因素,各因素对红枣脆片感官总分的影响顺序为:物料厚度 > 干燥温度 > 真空度。当物料厚度为 3 mm、真空度 0.08 MPa、干燥温度 60 °C 时干燥出的产品感官评分最高分 91.68 分。通过与传统热风干燥方式进行对比,可以得出,真空干燥的红枣脆片各感官指标均优于热风干燥的红枣脆片的感官指标。

参考文献

- [1] 刘孟军,王玖瑞,刘平,等.中国枣生产与科研成就及前沿进展[J].园艺学报,2015(9):1683-1698.
- [2] Qu C, Yu S, Luo L, et al. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *russula* sp. by response surface methodology [J]. Chemistry Central Journal, 2013, 1(7): 160-166.
- [3] Guo S, Duan J, Tang Y, et al. Simultaneous qualitative and quantitative analysis of triterpenic acids, saponins and flavonoids in the leaves of two *Ziziphus* species by HPLC-PDA-MS/ELSD [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2011, 56(2): 264-270.
- [4] Cheng G, Bai Y, Zhao Y, et al. Flavonoids from *Ziziphus jujuba* Mill var. *spinosa* [J]. Tetrahedron, 2000, 56(45): 8915-8920.
- [5] 张琼,王中堂,单公华,等.枣化学成分研究进展[J].江西农业学报,2013(11):25-29.
- [6] Pawlowska A M, Camangi F, Bader A, et al. Flavonoids of *Zizyphus jujuba* L. and *Zizyphus spina - christi* (L.) Willd (Rhamnaceae) fruits [J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 858-862.
- [7] 陈琼.枣主要功能因子综合评价及抗氧化、抑肿瘤活性成分鉴定[D].天津:天津大学,2015.
- [8] Fang S, Wang Z, Hu X, et al. Hot-air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): Physicochemical properties of dried products [J]. Food Science and Technology, 2009, 44(7): 1415-1421.

[9] 陈恺, 李琼, 周彤, 等. 不同干制方式对新疆哈密大枣香气成分的影响[J]. 食品科学, 2017(14): 158-163.

[10] 黎斌, 彭桂兰, 吴绍峰, 等. 魔芋真空干燥特性及动力学模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2017(8): 115-122.

[11] 孙庆运, 王光辉, 王德成. 黄芪切片真空干燥特性与吸湿特性的研究[J]. 食品工业科技, 2017(22): 76-81.

[12] 孟国栋, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 基于响应面法的花椒真空干燥工艺参数优化[J]. 食品与发酵工业, 2017(10): 137-143.

[13] Sinija V R, Mishra H N. Fuzzy Analysis of sensory data for quality evaluation and ranking of instant green tea powder and granules[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 3(4): 408-416.

[14] 赵正梅, 柴文杰, 迪拉热木·热黑木, 等. 模糊数学法评判红枣渣-小麦混合粉加工工艺[J]. 食品工业, 2016(9): 128-131.

[15] 秦波, 路海霞, 陈团伟, 等. 模糊综合评价法在紫薯干燥方法筛选中的应用[J]. 包装与食品机械, 2015(1): 8-12.

[16] 段续, 刘文超, 任广跃, 等. 双孢菇微波冷冻干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2016(12): 295-302.

[17] 薛少, 薛佳宜, 任彩霞, 等. 石榴果粉复合固体饮料的制备工艺及配方研究[J]. 食品科学技术学报, 2016(5): 78-83.

[18] 阙凤珍, 温少挺. 应用模糊数学综合评价两种干燥工艺花茶的感官品质[J]. 福建茶叶, 2017, 39(1): 10-11.

[19] 朱由珍, 吉薇, 吉宏武, 等. 基于模糊数学评价法优化木瓜脆片真空油炸工艺[J]. 食品工业科技, 2017(18): 183-188.

[20] 罗东升, 王梅, 朱玉丽, 等. 不同干燥技术对鲜切枣片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017(17): 88-94.

[21] Xiao H, Law C, Sun D, et al. Color Change Kinetics of American Ginseng (Panax quinquefolium) Slices During Air Impingement Drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427.

[22] Huang L L, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 279-284.

[23] Sallam K I. Chemical, sensory and shelf life evaluation of sliced salmon treated with salts of organic acids [J]. Food Chemistry, 2007, 101(2): 592-600.

[24] 余疾风. 在食品感官质量的模糊综合评价中如何正确的制定权重分配方案[J]. 食品科学, 1990(1): 15-16.

[25] 朱金尧, 郭志瑞. 应用模糊综合评判进行食品感官质量评价的实施报告[J]. 食品科学, 1987(10): 11-15.

[26] 孙传祝, 石东岳, 王相友, 等. 单片物料厚度对胡萝卜红外薄层干燥水分迁移的影响[J]. 食品科学, 2017(13): 53-59.

[27] 巩桂芬, 李阳. 香蕉片热风-微波真空联合干燥研究[J]. 食品与发酵工业, 2016(11): 138-141.

[28] 姬长英, 蒋思杰, 张波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017(13): 296-302.

[29] 温纪平, 王大一, 卞科. 响应面法优化酵母老面馒头生产工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2017(3): 118-123.

[30] 赵文娟, 宋扬, 李文婧, 等. 响应面法优化黑果枸杞中原花青素提取工艺[J]. 食品工业科技, 2017(9): 252-256.

[31] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016(15): 100-106.

(上接第 163 页)

率为 4.27%, RSD 为 1.23%, 依据最优条件进行 100 倍放大研究, 经 HPLC 检测, 柚皮苷得率为 4.25%, 与传统热回流提取方法对比发现, 超声辅助双水相提取具有时间短、温度低、能耗小、稳定性好、得率高等优点, 优势明显。该工艺具有操作简单、成本低廉、设备要求低、易放大生产等优点, 为工业制备柚皮苷提供了一定理论基础和科学依据。

参考文献

[1] 于宏伟, 谷维娜, 李娜, 等. 柚皮苷的提取方法及其应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1516-1518.

[2] 杨爽, 苏智先, 边清泉, 等. 柚果实不同部位的柚皮苷含量分析[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(5): 937-940.

[3] 谢新华, 汤跃云. 优良柚类品种—菊花芯柚[J]. 广西园艺, 2006, 17(5): 24-26.

[4] 许有瑞, 聂琼嵘, 顾生玖, 等. 沙田柚幼果中柚皮苷提取工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18): 7525-7534.

[5] 周强, 汪秋安, 邹亮华. 柚皮中柚皮苷的超声提取方法研究[J]. 湖南科技学院学报, 2008, 29(8): 41-43.

[6] 朱名毅, 蒙山, 高洁, 等. 正交试验法优选柚皮苷的提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(3): 125-128.

[7] 刘磊磊, 李秀娜, 赵帅. 双水相萃取在中草药活性成分提取分离中的应用进展[J]. 中草药, 2015, 46(5): 766-773.

[8] Ma F Y, Gu C B, Li C Y, et al. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of isoflavonoids from Dalbergia odorifera T. Chen leaves [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 115: 136-144.

[9] Guo Y X, Han J, Zhang D Y, et al. An ammonium sulfate/ethanol aqueous two-phase system combined with ultrasonication for the separation and purification of lithospermic acid B from Salvia miltiorrhiza Bunge [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19: 719-724.

[10] Liu Y, Han J, Wang Y, et al. Selective separation of flavones and sugars from honeysuckle by alcohol/salt aqueous two-phase system and optimization of extraction process [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 118: 776-783.

[11] Zhang D Y, Zu Y G, Fu Y J, et al. Aqueous two-phase extraction and enrichment of two main flavonoids from pigeon pea roots and the antioxidant activity [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 102: 26-33.

[12] Zhang W, Liu X Q, Fan H J, et al. Separation and purification of alkaloids from Sophora flavescens Ait. by focused microwave-assisted aqueous two-phase extraction coupled with reversed micellar extraction [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 86: 231-238.

[13] Xia J C, Ni L, Han J, et al. Simultaneous aqueous two-phase flotation of sodium chlorophyllin and removal of sugars from saponified solution of bamboo leaves [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2016, 101: 41-49.

[14] 刘磊磊, 赵帅, 王欢, 等. 响应面法优化超声波辅助乙醇/盐双水相萃取栀子中京尼平苷[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(2): 93-100.

[15] 赵帅, 刘磊磊, 郭婕, 等. 双水相气浮溶剂浮选法分离富集杜仲叶中京尼平苷酸[J]. 中草药, 2015, 46(16): 2400-2406.