

# 黑芝麻复合蜜丸的配方优化

游静, 孙强\*, 麻琳, 宋国辉, 黄纪念

1. 河南省农业科学院农副产品加工中心(郑州 450000); 2. 河南省农科院农副产品加工所(郑州 450000)

**摘要** 以黑芝麻粉、蜂蜜、药食同源中药粉(酸枣仁、茯苓、黄精、百合)为原料,通过混料试验设计,利用模糊数学感官评价法,建立黑芝麻粉、中药粉、蜂蜜与感官评分之间的回归模型,研究黑芝麻复合蜜丸的加工工艺。结果表明,黑芝麻复合蜜丸的最优配方为黑芝麻粉添加量47.9%、中药粉添加量10%、蜂蜜添加量42.1%。在此条件下制出的黑芝麻复合蜜丸,甜度适宜,软硬适中,黑芝麻香味突出,同时又与中药风味协调。

**关键词** 蜜丸;黑芝麻粉;中药粉;混料试验;模糊感官评价

## Formula Optimization of Black Sesame Compound Honey Pill

YOU Jing, SUN Qiang\*, MA Lin, SONG Guohui, HUANG Jinian

1. Agricultural and Sideline Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences (Zhengzhou 450000);

2. Agricultural and Sideline Products Processing Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences (Zhengzhou 450000)

**Abstract** Using black sesame powder, honey, and the same medicinal and food materials including wild jujube seed, tuckahoe, polygonatum and lily as raw materials, through the design of mixing experiments, using fuzzy mathematics sensory evaluation method to establish the regression model between black sesame powder, traditional Chinese medicine powder and honey with sensory scores, the processing technology of black sesame compound honey pill was researched. The results showed that the optimal formula of black sesame compound honey pill was black sesame powder addition 47.9%, traditional Chinese medicine powder addition 10% and honey addition 42.1%. The black sesame compound honey pill prepared under these conditions had uniform color, luster, fine taste, non-greasy and moderate sweetness, and had both the fragrance of black sesame and the fragrance of Chinese medicine.

**Keywords** honey pill; black sesame powder; Chinese medicine powder; mixture design; fuzzy sensory evaluation

芝麻(*Sesamum indicum* L.)被称为八谷之冠,我国是芝麻的生产与消费大国,芝麻年产量在60万 t左右,年消费量在100万 t以上<sup>[1]</sup>。黑芝麻含有蛋白质、矿物质、不饱和脂肪酸、维生素、木脂素类物质和黑色素等营养物质,其营养保健价值为人们所共识,自古以来就被认为是养生保健的佳品<sup>[2]</sup>。

《中国药典》记载,黑芝麻性平、味甘,入肝、肾、大肠经,具有补肝肾、益精血、润肠燥等功效,酸枣仁具有宁心安神、促进睡眠的作用<sup>[3]</sup>,茯苓系多孔菌科植物茯苓的干燥菌核,为主治水肿尿少、惊悸失眠的中药配方中不可缺少的成分<sup>[4]</sup>,黄精有补肾益精、补脾益气、滋阴润燥的功效<sup>[5]</sup>,百合可养阴润肺、清心安神。中医认为,胃不和则卧不安,虚劳虚烦不得眠,失眠与心、肝、脾、肾脏器失常及阴血不足有关,神经衰弱者多见此症,黑芝麻配以药食同源材料酸枣仁、茯苓、黄精与百合,有健脾补肾,益气养血之功效。蜜丸因其口味香甜、软糯,深受消费者喜爱,目前市面上的蜜丸产品普遍过油过甜、同质化竞争严重,因此有必要对蜜丸的配方进行优化,寻得最优配方。

为减少食品评价过程中主观性的干扰和指标描述的模糊化,采用模糊感官评价<sup>[6]</sup>。模糊感官评价将定

性评价转化为定量评价,使得结果更加具有准确性,在食品行业得到广泛利用<sup>[7-10]</sup>。混料设计适合研究多种成分产品的一种响应面试验方法<sup>[11]</sup>,可分析各组分之间的交互影响,也是产品优化和开发中较为常用的一种试验方法<sup>[12-14]</sup>。

利用低温液压压榨脱脂技术对黑芝麻进行脱脂,稳定制粉技术,采用混料试验设计,模糊感官评分作为评价指标,优化黑芝麻复合蜜丸的工艺配方,为市场上黑芝麻开发利用提供更多思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

黑芝麻(河南省驻马店康博汇鑫有限公司);黄精粉、茯苓粉、百合粉(上海今良食品有限公司);酸枣仁(神农金康原生态茶业有限责任公司);槐花蜂蜜(久创科技有限公司);冰乙酸、三氯甲烷、碘化钾、硫代硫酸钠、石油醚(沸程30~60℃)、无水硫酸钠、重铬酸钾、95%乙醇、无水硫酸钠、无水乙醚(均为分析纯)。

### 1.2 仪器与设备

滚筒炒锅(GTJ型,青岛德维机械制造有限公司);液压榨油机(洛丰);大蜜丸机(山东精诚医

\*通信作者;基金项目:国家特色油料产业技术体系(CARS-4);河南省农业科学院创新团队(2021TD08)

药装备制造有限公司); 手提式中药粉碎机 (DXF-060型, 广州市大祥电子机械设备有限公司); 酸、碱式滴定管 (江苏三爱思科学仪器有限公司); 恒温水浴锅 (HH-4型, 常州市亿能实验仪器厂); 500 mL索氏脂肪提取装置 (蜀牛玻璃仪器有限公司); TMS-Pro型质构仪 (美国FTC公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 工艺流程

中药粉 ↘      ↙ 炼蜜

黑芝麻→炒制→制粉→混合→总混→制丸→包装→成品

#### 1.3.2 操作要点

##### 1.3.2.1 制粉

挑选籽粒饱满、无霉变的黑芝麻, 炒至芝麻口感香脆、无苦味、不粘牙, 采用液压压榨 (根据前期预试验的结果, 确定液压压榨的工艺参数: 压榨压力30 MPa、压榨次数2次), 去除部分油脂, 后粉碎, 过0.250 mm (60目) 筛网备用。

##### 1.3.2.2 炼蜜

称取适量蜂蜜, 炼蜜至蜂蜜温度达到115 ℃。

##### 1.3.2.3 混合

混料: 将中药粉粉碎过0.250 mm (60目) 筛网, 称取后与黑芝麻粉混合均匀。

总混: 采用和面机, 将蜂蜜与混合粉搅拌均匀, 制成蜜丸块。

##### 1.3.2.4 制丸

将蜜丸块投入全自动制丸机中, 出条、出丸, 然后包装即可。

#### 1.3.3 感官评定方法

感官评价组成员由8位经过专业培训的品评员构成, 于专业品尝室中进行品尝, 品尝者就其滋味、色泽、组织形态和口感等指标进行评分, 感官评定标准如表1所示。

表1 感官评价标准

项目	评分标准	感官描述	分值/分
色泽 (10分)	优	蜜丸色泽均一, 有光泽	9~10
	良	蜜丸色泽较均一, 较有光泽	7~8
	中	蜜丸色泽不均一, 稍有光泽	5~6
	差	蜜丸色泽很不均一, 无光泽	<5
口感 (40分)	优	口感细腻, 不油腻, 甜度适中, 易于接受	35~40
	良	口感较细腻, 稍油腻, 稍甜, 可以接受	30~34
	中	口感较细腻, 稍油腻, 稍甜, 可以接受	25~29
	差	口感很粗糙, 很油腻, 太甜, 难以接受	<25
组织状态 (20分)	优	软硬适中	18~20
	良	略软或略硬	15~17
	中	较软或较硬	12~14
	差	非常软或非常硬	<12
滋味 (30分)	优	芝麻香味与中药味协调	25~30
	良	芝麻香味稍淡或中药味稍重	20~24
	中	芝麻香味过淡, 或中药味过重	15~19
	差	无香味, 或有异味	<15

#### 1.3.4 单因素试验

通过查阅中国药典及前期预试验, 中药粉中酸枣仁、茯苓、黄精、百合质量比为3:3:3:1。

##### 1.3.4.1 中药粉添加量对感官评分的影响

按照蜜丸制备工艺, 感官评价标准参照表1, 固定黑芝麻粉36 g、蜂蜜50 g, 分别考察中药粉添加量5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%和40%对蜜丸感官评分的影响。

##### 1.3.4.2 黑芝麻粉添加量对感官评分的影响

按照蜜丸制备工艺, 感官评价标准参照表1, 固定混合中药粉15 g、蜂蜜50 g, 分别考察黑芝麻粉添加量12%, 20%, 28%, 36%, 44%, 52%, 60%和68%对黑芝麻复合蜜丸感官评分的影响。

##### 1.3.4.3 蜂蜜添加量对感官评分的影响

按照蜜丸制备工艺, 感官评价标准参照表1, 固定混合中药粉15 g、黑芝麻粉36 g, 分别考察蜂蜜添加量33%, 38%, 43%, 48%, 53%, 58%, 63%和68%对蜜丸感官评分的影响。

#### 1.3.5 模糊评价

##### 1.3.5.1 因素集和评语集的确立

因素集即影响黑芝麻中药蜜丸质量的指标集合, 表示为 $A=(A_1, A_2, \dots, A_i)$ , 其中 $A$ 表示因素集,  $A_i$ 表示第 $i$ 个因素。黑芝麻中药蜜丸有4项指标决定其感官品质, 即 $A=(a_{滋味}, a_{色泽}, a_{组织形态}, a_{口感})$ 。

##### 1.3.5.2 权重集的确立

根据各个因素在黑芝麻复合蜜丸中的作用, 口感、滋味关键程度相当, 其次是组织形态和色泽, 试验的权重设定为口感>滋味>组织状态>色泽, 因素权重表示为 $X=[0.4, 0.3, 0.2, 0.1]$ 。

##### 1.3.5.3 模糊数学矩阵的确立及感官评分

为更好地比较样品的优劣, 将模糊向量单值化进行比较排序, 给优、良、中、差4个等级分别赋予90, 80, 70和60分。模糊矩阵建立与结果计算: 统计每个感官指标的评语类别和数量, 根据模糊变换公式 $Z=X \times R$  ( $R$ 表示隶属度矩阵), 根据评语集进行加和, 得到每个产品的综合评分<sup>[15-16]</sup>。

#### 1.3.6 混料试验设计

在单因素试验的基础上, 以模糊感官评分为响应值, 以混合中药粉添加量 ( $A$ )、黑芝麻粉添加量 ( $B$ )、蜂蜜添加量 ( $C$ ) 为自变量, 其中 $A+B+C=1$ , 利用Design-Expert软件建立各因素与模糊感官评分之间的回归方程, 并通过软件分析出最优方案。

#### 1.3.7 质构分析

使用TMS-Pro型质构仪对产品进行全质构分析 (TPA)<sup>[17]</sup>。测定参数: 直径5 cm的圆柱形平板探头, 压缩程度50%, 测试速率60 nm/min, 触发力5 N, 暂停时间1 s。每个样品测定5次, 结果以平均值表示。

### 1.3.8 酸价和过氧化值的测定

按照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》和GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》检测酸价和过氧化值。

### 1.3.9 微生物检测

按照GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》和GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》检测菌落总数与大肠杆菌。

### 1.3.10 数据处理与分析

采用Excel软件进行数据处理分析,采用Graph Pad Prism软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果分析

#### 2.1.1 中药粉添加量对蜜丸感官评分的影响

由图1可知,中药粉添加量对蜜丸整体感官评分的影响呈现先升后降趋势。中药粉添加量低于10%时,中药风味过淡,中药粉添加量高于35%时,中药味掩盖黑芝麻的香味,蜜丸感官评分下降,因此选择10%~35%中药粉添加量。

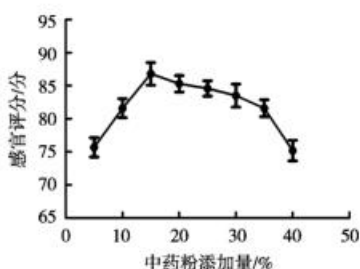


图1 中药粉添加量对蜜丸感官评分的影响

#### 2.1.2 黑芝麻粉添加量对蜜丸感官评分的影响

由图2可知,黑芝麻粉添加量低于44%时,随着

黑芝麻粉添加量增加,感官评分逐渐上升,黑芝麻的风味得到呈现,口感得到优化,而黑芝麻粉添加量高于52%时,中药粉的风味被掩盖,感官评分呈现下降趋势,因此选择20%~52%黑芝麻粉添加量。

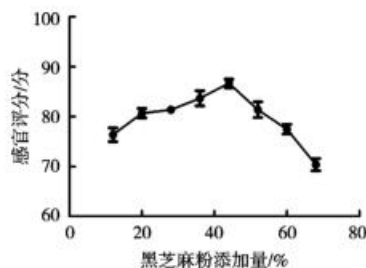


图2 黑芝麻粉添加量对蜜丸感官评分的影响

#### 2.1.3 蜂蜜添加量对蜜丸感官评分的影响

由图3可知,随着蜂蜜添加量增加,感官评分呈现先升后降趋势,蜂蜜添加量低于38%时蜜丸的组织状态较硬,蜂蜜添加量高于53%时,甜度较重,感官评分逐渐下降。因此,选择38%~48%蜂蜜添加量。

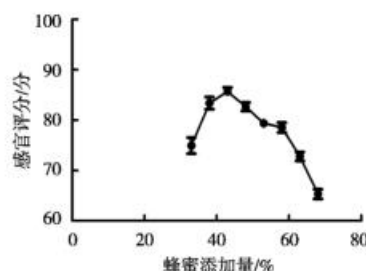


图3 蜂蜜添加量对蜜丸感官评分的影响

### 2.2 混料试验结果

#### 2.2.1 模糊感官评价结果

根据混料试验设计,按照蜜丸工艺流程,制作16组产品,让品评员按照模糊评价既定程序进行评价,得到的评定结果如表2所示。

表2 模糊感官评价结果

样品	色泽				口感				组织状态				滋味			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
1	4	4	0	0	2	2	4	0	0	1	6	1	0	3	5	0
2	5	3	0	0	1	4	2	1	4	3	1	0	3	3	1	1
3	0	3	2	3	1	1	6	0	0	4	4	0	1	1	6	0
4	8	0	0	0	5	2	1	0	3	2	3	0	5	2	1	0
5	4	4	0	0	0	6	2	0	1	5	2	0	5	1	2	0
6	5	2	1	0	3	3	2	0	2	4	1	1	4	4	0	0
7	5	3	0	0	3	3	2	0	2	5	1	0	5	2	1	0
8	0	3	3	2	0	6	2	0	0	4	4	0	0	2	6	0
9	3	2	3	0	1	4	2	1	3	1	3	1	3	4	1	0
10	8	0	0	0	4	4	0	0	3	2	3	0	6	1	1	0
11	2	5	1	0	1	5	2	0	3	4	1	0	1	5	2	0
12	3	4	1	0	3	3	2	0	2	3	3	0	1	3	3	1
13	3	3	1	1	1	2	4	1	0	2	6	1	0	3	4	1
14	0	3	3	2	1	5	1	1	0	4	4	0	1	1	5	1
15	1	4	2	1	0	5	2	1	2	2	3	1	0	2	6	0
16	2	5	1	0	0	2	5	1	0	2	5	1	0	3	5	0

以样品1为例,由模糊感官评价表评分结果可以

$$\text{得到模糊矩阵: } R_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0.75 & 0.125 \\ 0 & 0.375 & 0.625 & 0 \end{bmatrix}。$$

根据矩阵,得到第1个产品的评价结果:  $Y_1 = X \times$

$$R_1 = (0.1 \ 0.4 \ 0.2 \ 0.3) \times \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0.75 & 0.125 \\ 0 & 0.375 & 0.625 & 0 \end{bmatrix} = [0.15 \ 0.2875 \ 0.5375 \ 0.025]。$$

模糊评价综合得分:  $S = Y \times K$ 。

由  $Y_1 = [0.15 \ 0.2875 \ 0.5375 \ 0.025]$ , 评价集  $K_1 = 90, K_2 = 80, K_3 = 70, K_4 = 60$ , 得到第1个产品的综合评价得分:  $S_1 = 75.625$ , 同理计算其他样品的得分, 结果如表3所示。

表3 蜜丸混料试验设计及结果

序号	A中药粉添加量	B黑芝麻粉添加量	C蜂蜜添加量	感官评分/分
1	0.1	0.42	0.48	75.625
2	0.289	0.287	0.424	79.875
3	0.35	0.2	0.45	73.625
4	0.151	0.412	0.436	84.5
5	0.27	0.35	0.38	80.375
6	0.207	0.371	0.422	82.25
7	0.207	0.371	0.422	82.875
8	0.279	0.241	0.48	74.875
9	0.1	0.52	0.38	78.75
10	0.151	0.412	0.436	84.875
11	0.158	0.462	0.38	79.75
12	0.1	0.52	0.38	79
13	0.279	0.241	0.48	73.5
14	0.35	0.2	0.45	74.875
15	0.35	0.27	0.38	74.625
16	0.165	0.355	0.48	73

### 2.2.2 模糊感官评价结果与回归方程的建立

使用统计分析软件Design-Expert 8.0.6, 以感官评分为响应值, 混合中药粉添加量(A)、黑芝麻粉添加量(B)、蜂蜜添加量(C)为自变量, 建立三因素混料设计优化试验, 设计方案和结果如表3所示。使用统计分析软件Design-Expert 8.0.6对D-混料试验结果进行回归分析, 得到感官评分(Y)与中药粉添加量(A)、黑芝麻粉添加量(B)、蜂蜜添加量(C)的回归方程:  $Y = 59.59A + 78.95B - 803.99C + 45.98AB + 1581.44AC + 1455.13BC - 1372.59ABC + 29.83AB(A-B) - 693.17AC(A-C) - 497.31BC(B-C)$ 。

### 2.3 黑芝麻复合蜜丸模型的建立与显著性分析

对黑芝麻复合蜜丸回归模型实行方差分析, 由表4可知, 回归模型的  $p < 0.0001$ , 模型极显著, 失拟项不存在显著性。从模型也可看出AB交互作用显著,

说明该模型能够准确且真实地模拟、预测黑芝麻复合蜜丸的感官评分。

表4 蜜丸回归方程的方差模型分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
模型	242.50	9	26.94	67.9	<0.0001	***
混合线性模型	79.79	2	39.9	100.54	<0.0001	***
AB	13.86	1	13.86	34.93	0.0010	**
AC	1.83	1	1.83	4.62	0.0752	*
BC	1.53	1	1.53	3.87	0.0968	*
AB(A-B)	4.57	1	4.57	11.51	0.01001	**
AC(A-C)	1.57	1	1.57	3.96	0.0938	*
BC(B-C)	0.73	1	0.73	1.84	0.2239	*
残差	2.38	6	0.40			
失拟项	0.36	1	0.36	0.88	0.3904	*
纯误差	2.02	5	0.40			
总和	244.88	15				

注: \*\*\*表示差异极显著 ( $p < 0.001$ ); \*\*表示差异显著 ( $p < 0.05$ ); \*表示差异不显著 ( $p > 0.5$ )。

### 2.4 三元曲面图分析

使用统计分析软件Design-Expert 8.0.6在回归模型的基础上, 建立中药粉添加量(A)、黑芝麻粉添加量(B)、蜂蜜添加量(C)三因素交互作用的三元等值线图以及曲面3D图<sup>[18-19]</sup>, 中药粉添加量、黑芝麻粉添加量、蜂蜜添加量交互作用对黑芝麻复合蜜丸的感官评价影响作用如图4所示。模型呈现曲面, 当中药粉、黑芝麻粉、蜂蜜取适宜比例时, 可得到黑芝麻复合蜜丸感官评分的最大值。

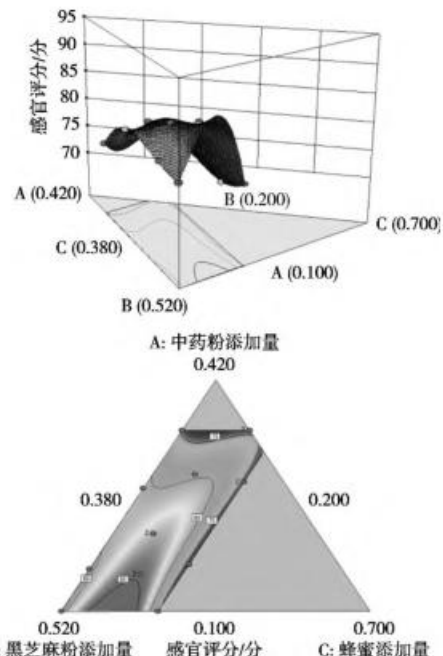


图4 中药粉添加量、黑芝麻粉添加量、蜂蜜添加量交互作用对感官评价的影响及混合等值线图

### 2.5 黑芝麻复合蜜丸配方优化

使用统计分析软件Design-Expert 8.0.6, 以感官

评价为响应值得到一组最优组合：A中药粉添加量（10%），B黑芝麻粉添加量（47.9%），C蜂蜜添加量（42.1%）。在该方案下，理论最大感官评分为87.03分。按表5进行3次验证试验，最终验证试验感官评价结果为87.25分，与理论最大感官得分相对误差为0.25%，说明该模型拟合度较好，具有价值性<sup>[20]</sup>。

表5 验证试验结果感官评分 单位：分

指标	试验号			平均值
	1	2	3	
感官评分	87.35	86.9	87.5	87.25±0.31

### 2.6 黑芝麻复合蜜丸最优配方理化指标检测与质构分析结果

采用优化后的配方生产黑芝麻复合蜜丸，并对其水分、酸价、过氧化值等基本理化指标<sup>[21]</sup>和微生物指标（菌落总数、大肠杆菌）进行检测，结果如表6所示。各项指标均符合标准要求，表明此配方符合商业化生产要求。食品的质构性质直接影响食品的口腔行为、风味释放和感官愉悦<sup>[22]</sup>，黑芝麻复合蜜丸质构分析结果如表7所示。

表6 蜜丸理化及微生物指标

测定项目	技术要求	检测结果	单项结论
水分/%	≤ 15	8.4±0.017	合格
酸价(以脂肪计)/(mg·g <sup>-1</sup> )	≤ 4	1.7	合格
过氧化值(以脂肪计)/(g·100g <sup>-1</sup> )	≤ 0.5	0.017	合格
菌落总数/(CFU·g <sup>-1</sup> )	≤ 1 000	<10	合格
大肠杆菌/(CFU·g <sup>-1</sup> )	≤ 10	<10	合格

表7 TPA试验结果

项目	黑芝麻复合蜜丸
硬度/N	32.48±0.37
内聚性	0.2±0.01
弹性/mm	0.76±0.002
胶黏性/N	3.42±0.089
咀嚼性/mj	2.7±0.023

### 3 结论

试验通过D-混料设计，使用模糊感官评价对黑芝麻复合蜜丸进行配方优化，考察中药粉添加量（A）、黑芝麻粉添加量（B）、蜂蜜添加量（C）3个因素对感官评价的影响，通过建立3种原料配比与感官评价之间的回归模型以研究蜜丸中各成分之间交互作用。结果表明：最佳工艺配方为黑芝麻粉添加量47.9%、中药粉添加量10%、蜂蜜添加量42.1%。按该配方制出的黑芝麻复合蜜丸色泽均一、有光泽、口感细腻、不油腻、甜度适中，兼具黑芝麻的香味与中药药香。

#### 参考文献：

[1] 芦鑫, 贾聪, 高锦鸿, 等. 体外模拟消化芝麻蛋白产生抗氧化肽的分离纯化与构效研究[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 891-901.  
 [2] 金征宇, 蔡灿欣, 田耀旗, 等. 黑芝麻功能成分的构效关系

[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 1-7.  
 [3] 陈琼, 陈朋, 李俊颖, 等. 酸枣仁提取物与茶氨酸复合配方对睡眠的改善作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 155-159.  
 [4] 陈群, 王爱云, 焦庆才. 茯苓多糖硫酸酯的制备与鉴定及其增强小鼠NK细胞活性[J]. 食用菌学报, 2009, 16(3): 48-52.  
 [5] 陈宇, 周芸滢, 李丹, 等. 黄精的现代药理作用研究进展[J/OL]. 中药材, 2021(1): 240-244[2021-02-23]. https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2021.01.046.  
 [6] 张勋, 张丽霞, 芦鑫, 等. 混料试验与模糊评价结合优化挤压膨化芝麻制品工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 248-253.  
 [7] 肖丽翠, 闫征, 王道营, 等. 基于模糊感官评价的黄羽肉鸡品种对鸡汤品质影响分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 45-50.  
 [8] 孙丽滢, 陈体昌, 钟龙. 基于模糊感官的虾皮对复合调味汁感官品质的影响分析[J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 167-170.  
 [9] 玉王宁, 刘杰, 刘士伟, 等. 模糊感官评价在双螺杆挤压杂粮工程米工艺优化中的应用[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 89-94, 114.  
 [10] 刘敏, 谭书明, 张洪礼, 等. 基于模糊感官评价对大米感官品质分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 247-251.  
 [11] KRISTOFFERSEN P, SMUCKER B J. Model-robust design of mixture experiments[J]. Quality Engineering, 2020, 32(4): 663-675.  
 [12] 陈碧, 欧小春, 陆雅思, 等. D-最优混料与响应面法优化甜茶无糖抗氧化活性蛋糕配方[J/OL]. 食品工业科技: 1-12[2021-02-20]. 1002-0306.2020090177.  
 [13] 孙强, 罗秦, 叶欣, 等. 应用混料试验设计研制糯米猕猴桃配制酒[J]. 食品工业, 2014, 35(5): 127-130.  
 [14] 郭亚丽, 李芳, 洪媛, 等. D-最优混料试验设计优化模拟米制品的配方[J]. 食品科技, 2015, 40(9): 164-168.  
 [15] 于伟茹, 宋慧妍, 徐欣宇, 等. 基于模糊数学结合响应面法优化蓝莓果渣压片糖果配方[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 169-173.  
 [16] 赵晶, 陈喜君, 张筠, 等. 模糊数学评价结合响应面法优化发酵核桃乳工艺[J]. 食品科技, 2020, 45(8): 98-106.  
 [17] 高帅平, 王安建, 田广瑞, 等. 香菇红枣糕的生产工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 89-93.  
 [18] 杨天意, 张涛, 许志诚, 等. 混料设计优化发芽糙米香蕉复合米粉配方[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 110-114.  
 [19] 张新风, 朱志彬, 李光辉, 等. 混料模型D-最优试验设计的改进DE算法研究[J/OL]. 数理统计与管理: 1-10[2021-02-26]. 20200526-003.  
 [20] 吴俊师, 刘巧瑜, 曾晓房, 等. 低糖南瓜馅料配方优化研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(4): 135-142.  
 [21] ILGIN D, HILAL U H, OGUZ U, et al. Prediction of chemical parameters and authentication of various cold pressed oils with fluorescence and mid-infrared spectroscopic methods[J]. Food Chemistry, 2020, 345: 128815-128815.  
 [22] 陈伟, 陈建设. 食品的质构及其性质[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 377-384.