

干豇豆的腌渍工艺优化

卜智斌^{1,2}, 唐道邦¹, 温靖¹, 徐玉娟¹, 余元善¹, 傅曼琴¹, 李俊¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 广东佳宝集团有限公司, 广东潮州 515638)

摘要: 本研究以干豇豆为原料进行浸泡腌渍调味, 开发即食豇豆制品, 通过设计响应面试验, 讨论浸泡液中白砂糖、食盐与醋酸添加比例对浸泡腌渍后豇豆总酸度、硬度、 L^* 值、复水比、感官评分的影响, 分析影响各指标的次要因素及因素间的交互作用并建立二次回归模型, 利用熵权法对各个响应值赋权值进行多目标优化, 得到最佳工艺参数并加以验证。结果表明: 建立总酸度、硬度、感官评分 3 个指标的回归方程模型均极显著 ($p < 0.01$), L^* 值指标的回归方程模型显著 ($p < 0.05$), 复水比指标的回归方程模型则不显著, 可用于对干豇豆浸泡腌渍工艺指标进行分析和预测; 熵权法综合评分的回归方程显著 ($p < 0.05$), 可用于腌渍工艺的多目标优化, 得到最佳工艺配方: 食盐 4%、醋酸 1.4%、白砂糖 11.8%, 在此条件下进行验证试验, 腌渍后豇豆的总酸度 0.44、硬度 217.03 g、 L^* 值 42.31、复水比 2.94、感官评分 85.29 分, 与理论预测值接近, 说明响应面结合熵权法优化具有较好的准确性和可靠性, 可为后续研究提供理论依据。

关键词: 豇豆; 腌渍; 感官评分; 响应面; 多目标优化

文章编号: 1673-9078(2021)03-212-19

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.3.0772

Optimization of Pickling Processing of Dried Cowpea

BU Zhi-bin^{1,2}, TANG Dao-bang¹, WEN Jing¹, XU Yu-juan¹, YU Yuan-shan¹, FU Man-qin¹, LI Jun¹

(1. Sericultural and Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods Ministry of Agriculture and Rural Affairs Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. Guangdong Jiabao Group Co. Ltd., Chaozhou 515638, China)

Abstract: In order to obtain instant cowpea products, the dried cowpea was used as raw material for soaking and pickling seasoning, the effects of salt, acetic acid, sugar contents and their interactions on total acidity, hardness, L^* value and rehydration ratio were explored, and the sensory evaluation of cowpea after soaking and pickling was also investigated, using three-factor response surface design. The factors and their interactions between the various factors were analyzed, quadratic regression models were established, multi-objective optimization was performed by entropy weight method, which were verified by applying three optimization methods. The results showed that the established regression model of total acidity, hardness, and sensory evaluation was very significant ($p < 0.01$), the regression model of L^* value was significant ($p < 0.05$) and the regression model of rehydration ratio was not significant, suggesting that the model could be used to analyze and predict the pickling processing of dried cowpea parameters. The optimum parameters were 4% of salt content, 1.4% of acetic acid content, and 11.8% of sugar content. With these parameters, the hardness, L^* value, rehydration ratio and sensory score were 0.44, 217.03 g, 42.31, 2.94, 85.29, respectively, which were close to the theoretical prediction. The parameters of pickling processing of dried cowpea were optimized by response surface design combined with entropy weight method, which were accurate and reliable, providing a theoretical basis for future study.

Key words: cowpea; pickled; sensory score; response surface; multi-objective optimization

引文格式:

卜智斌, 唐道邦, 温靖, 等. 干豇豆的腌渍工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(3): 212-219

BU Zhi-bin, TANG Dao-bang, WEN Jing, et al. Optimization of pickling processing of dried cowpea [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 212-219

收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系建设项目 (2019KJ110); 广州市科技计划项目 (201909020001; 201904020012); 广东省扬帆计划引进创新创业团队项目 (2017YT05H045)

作者简介: 卜智斌 (1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工

通讯作者: 温靖 (1978-), 女, 研究员, 研究方向: 果蔬加工

豇豆是我国重要的大宗蔬菜之一,又名长豆角,为夏秋季节盛产的豆荚类蔬菜。豇豆蛋白质含量高,富含粗纤维、碳水化合物、维生素和酚类物质等^[1,2],因其豆荚饱满、光泽嫩绿、味道可口、营养丰富而备受广大消费者的亲睐,在蔬菜消费和生产加工中占有重要的地位。豇豆的生长收获季节短且集中,鲜豇豆含水量较高(通常在90%以上),由于其在贮藏期间豆荚脆嫩容易发泡、呼吸速率高和失水严重,从而导致鲜豇豆出现萎蔫、腐烂、老化,非常不耐贮存^[3]。

豇豆作为新疆地区近年来脱贫增收的重要产业,年产量巨大,鲜食无法全部消耗,由于脱水蔬菜具有便于贮运、调节蔬菜淡旺季供应等特点^[4],当地习惯将豇豆晒制成干菜,可快速处理大量豇豆调节供求、有效减少产后损失,也是提升其附加值和种植收益的主要手段之一。以干豇豆为原料加工豇豆制品的研究较少,食用方法多以复水烹饪炒制为主,难以进一步延长豇豆产业链,提升豇豆的精深加工价值。

近年来,醋泡食品作为一种功能性食品具有较高的关注度,本研究采用白砂糖、食盐与醋酸的混合溶液浸泡复水与调味相结合,制得腌渍豇豆制品,主要利用高浓度的食盐、醋酸及其他香辛料的综合作用防腐保藏和增进风味^[5],为糖醋腌渍的非发酵蔬菜制品,目前市场上主要有糖醋脆萝卜、糖醋姜、酸笋、香甜萝卜干等产品^[6,7]。梁莉等人对比研究了不同前处理工艺对人工发酵和自然发酵豇豆产品品质的影响^[8],徐柯等人研究了泡豇豆自然发酵过程中有机酸变化及对亚硝酸盐降解的影响^[9],但对于以豇豆干制品为原料浸泡腌渍的研究未见报道。因此,本研究以新疆干豇豆为原料,采用醋酸、白砂糖及食盐混合溶液腌渍,添加姜、蒜、椒等其他调味配料进行浸泡复水调味,以浸泡腌渍后豇豆的总酸度、硬度、L*值、复水比、感官评分为考核指标,通过响应面试验结合熵权法多目标优化浸泡腌渍工艺配方,以期开发浸泡腌渍豇豆新产品提供一定的理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 原料

原辅料:干豇豆(水分含量17.44%)由新疆西圣果业有限责任公司提供;红米椒、大蒜购于当地农贸市场;冰醋酸、白砂糖、食盐均为食品级;三氯甲烷、氢氧化钠、酚酞均为国产分析纯。

主要仪器:打浆机,美的集团有限公司;UltraScan-VIS全自动色差仪,HunterLab;TA-XT Plus全质构分析仪,Stable Micro Systems;BCD-206T 海尔

冰箱,青岛海尔有限公司;ALC-210.4分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺流程

称取20 g干豇豆均匀切成5 cm左右长度后备用,用200 mL冷开水配制相应浓度的食盐、醋酸和白砂糖混合溶液,加入提前洗净切好的红米椒5 g、蒜末1.5 g,将干豇豆置于混合溶液中,密封置于室温条件下浸泡腌渍3 d,得到可即食的腌渍豇豆制品。

1.2.2 响应面实验

以混合浸泡液中食盐(A)、醋酸(B)、白砂糖(C)浓度为试验因素,以浸泡腌渍后豇豆的总酸度(Y_1)、硬度(Y_2)、色泽L*值(Y_3)、复水比(Y_4)、感官评分(Y_5)为优化参考指标,进行三因素三水平响应面试验,按照1.2.1所述工艺流程开展试验,浸泡结束后测定豇豆的总酸度、硬度、L*值和复水比,并进行感官评价,每组处理至少需重复3次,结果取平均值。试验设计如表1所示。

表1 响应面设计试验参数

Table 1 Response surface design and parameters

因素	水平		
	-1	0	1
A 食盐/%	3.0	4.0	5.0
B 醋酸/%	1.4	1.7	2.0
C 白砂糖/%	6.0	9.0	12.0

1.2.3 指标测定方法

1.2.3.1 总酸度

参考GB 5009.239-2016中的方法进行检测^[10]。

1.2.3.2 复水比

参考高鹤等人^[11]的方法做部分改进,在室温条件下取出浸泡腌渍后的豇豆样品,自然沥干5 min后称重,每组实验测定3次平行,结果取平均值,复水比按公式

(1) 计算:

$$\text{复水比} = m_1 / m_0 \quad (1)$$

式中: m_0 为浸泡前干豆角样品的质量/g; m_1 为浸泡腌渍后豇豆的质量/g。

1.2.3.3 硬度

通过全质构分析仪测定,将浸泡腌渍后的豇豆堆积高度15 mm,采用P50探头,对试样进行2次压缩的机械过程模拟人口腔的咀嚼运动,利用力学测试方法模拟食品质地的感官评价。测试前速率2 mm/s,测试速率2 mm/s,测试后速率1 mm/s,测定间隔时间5 s,压缩量30%,感应力5.0 g。每组实验重复10次,结果以硬度的

平均值表示。

1.2.3.4 色泽

采用全自动色差仪进行分析, 每个平行样测量 5 次取平均值。色泽指标包括 L^* 值(标准白板参数为: $L^*=91.45$, $a^*=0.01$, $b^*=0.02$)。其中 L^* 值表示亮度, L^* 值越大亮度越大。

1.2.3.5 感官评价

表 2 感官评定评分标准

Table 2 Sensory evaluation standard of cowpea

项目	状态	得分
色泽	色泽发暗, 呈灰黑色	0~6
	色泽稍暗, 略带褐色	7~13
	色泽透亮, 呈深绿色	14~20
形态	形状不完整或豆角表皮有薄膜	0~6
	形状较完整或豆角表皮有少量薄膜	7~13
	形状完整或豆角表皮有微量甚至无薄膜	14~20
气味	无酸豆角香气, 有酸败腐烂气味	0~6
	酸豆角香气较淡, 无异味	7~13
	有浓郁的酸豆角香气, 无异味	14~20
滋味	滋味过酸、过咸、过甜, 或滋味太淡	0~6
	滋味一般, 稍酸或稍咸, 有一些甜味	7~13
	滋味鲜美, 酸咸适中, 甜味不明显	14~20
口感	酸豆角组织太硬或太软, 脆性较差	0~6
	酸豆角组织较硬或较软, 脆性一般	7~13
	酸豆角组织软硬适中, 脆性好	14~20

参考库晓等人^[12]的方法做部分改进: 采用综合评价法对浸泡腌渍豇豆做感官评价, 以豇豆的色泽、形态、气味、滋味和口感 5 个项目为评价指标, 设定每个项目为 20 分制进行评定, 综合 5 个项目总分为感官评定评分, 最高分为 100 分。邀请 15 名人员进行测评, 测评人员的年龄在 20~35 岁之间, 男:女=2:3。评价方式采用风味食品常用的盲评打分法, 首先将豇豆样品置于纸杯中, 在室内自然亮光下色泽、形态, 同时闻其气味, 清水漱口后品尝其滋味, 体验口感并做相应记录, 按评分标准进行评分。计算所有测评人员评价分的平均值作为有效数据, 评分标准如表 2 所示。

1.2.3.6 熵权法综合评分优化

运用熵权法对各考察指标进行赋权得到客观权重值 W_j , 其中总酸度、硬度、 L^* 值分别影响感官评分的滋味、口感、色泽等指标, 总酸度和硬度适宜、 L^* 值和感官评分越高产品质量越好, 计算得出综合评分 F 。首先根据公式 (2) 将各个考察指标的数据 X_1, X_2, \dots, X_n 进行标准化处理, 其中 $X_j = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, i 为各项目的编号, j 表示各考察指标的编号。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (2)$$

根据公式 (3) 求各指标的信息熵 E_1, E_2, \dots, E_n , 其中 $P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}$, 如果 $P_{ij} = 0$, 则定义 $\lim_{P_{ij} \rightarrow 0} P_{ij} \ln P_{ij} = 0$:

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

按照公式 (4), 通过信息熵计算个指标的权重:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j} \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

按照公式 $F = \sum W_j Y_{ij}$ 计算各试验组的综合评分。

1.2.3.7 数据处理

试验数据采用 Excel 整理并统计分析、Design-Expert 10 进行响应面优化分析。

2 结果与讨论

2.1 响应面试验结果

根据响应面 Box-Behnken 试验设计方法, 对 17 组浸泡腌渍后豇豆的总酸度、硬度、 L^* 值、复水比和感官进行评价, 每个试验组重复 3 次用来估计试验误差, 结果如表 3 所示。

2.2 响应面回归模型的建立与分析

用 Design Expert 软件对试验数据进行回归处理, 得到总酸度 (Y_1)、硬度 (Y_2)、色泽 L^* 值 (Y_3)、复水比 (Y_4) 和感官评分 (Y_5) 与食盐 (A)、醋酸 (B)、白砂糖 (C) 浓度的回归方程, 分别见式 (5)、(6)、(7)、(8) 及 (9)。

$$Y_1 = 0.35403 - 0.13042A + 0.38055B + 0.01181C + 0.10833AB - 0.00499AC + 0.01389BC - 0.00249A^2 - 0.22222B^2 - 0.0138C^2 \quad (R^2 = 0.9078) \quad (5)$$

$$Y_2 = 794.42661 - 176.08933A - 254.43944B - 10.80733C + 60.19167AB + 6.96250AC - 17.24167BC + 1.60824A^2 + 51.86944B^2 + 0.74147C^2 \quad (R^2 = 0.9310) \quad (6)$$

$$Y_3 = 37.92238 + 30.35883A - 104.69556B + 5.00117C - 1.64167AB - 1.09250AC + 0.70833BC - 1.84225A^2 + 31.530556B^2 - 0.10081C^2 \quad (R^2 = 0.8354) \quad (7)$$

$$Y_4 = 2.55991 - 0.24608A + 1.11583B - 0.00350C - 0.18333AB + 0.00416AC + 0.00833BC + 0.06800A^2 - 0.133333B^2 - 0.00272C^2 \quad (R^2 = 0.6348) \quad (8)$$

$$Y_5 = 80.32045 + 27.70466A - 71.57904B + 4.90108C + 0.09722AB + 1.329167AC - 3.212972BC - 7.44833A^2 + 15.52777B^2 - 0.24843C^2 \quad (R^2 = 0.9635) \quad (9)$$

表3 响应面试验结果

Table 3 The results of response surface method

编号	食盐/%	醋酸/%	白砂糖/%	总酸度/°T	硬度/g	L*值	复水比	感官评分
1	5.0	1.4	9.0	0.42±0.04	182.54±29.59	43.64±1.31	3.12±0.09	68.50±5.69
2	5.0	1.7	6.0	0.59±0.05	182.37±22.07	42.35±2.11	3.09±0.08	60.25±4.51
3	3.0	1.7	6.0	0.56±0.03	216.76±25.56	29.73±1.53	3.07±0.05	76.01±3.61
4	3.0	1.7	12.0	0.53±0.04	176.63±26.45	39.13±2.53	2.88±0.12	71.80±5.51
5	4.0	1.7	9.0	0.58±0.02	186.49±30.37	41.82±2.58	3.01±0.07	80.51±2.52
6	4.0	2.0	12.0	0.56±0.08	200.46±37.38	41.85±2.76	2.91±0.08	71.6±6.66
7	3.0	1.4	9.0	0.53±0.02	218.98±37.09	36.73±1.66	2.96±0.09	84±3.61
8	5.0	2.0	9.0	0.61±0.04	213.9±35.77	44.7±2.88	2.95±0.15	68.75±3.06
9	3.0	2.0	9.0	0.59±0.04	178.11±25.08	39.76±0.85	3.01±0.12	73.33±2.52
10	4.0	1.4	6.0	0.52±0.03	175.4±27.77	43.71±2.26	2.94±0.06	80.33±7.64
11	4.0	1.7	9.0	0.56±0.04	197.37±26.96	38.37±2.11	3.06±0.11	78.4±6.51
12	4.0	1.7	9.0	0.54±0.04	189.63±28.95	42.62±1.88	2.91±0.13	81.75±6.03
13	5.0	1.7	12.0	0.5±0.02	225.79±22.47	38.64±2.38	2.95±0.05	72±2.65
14	4.0	1.7	9.0	0.59±0.03	191.22±29.76	40.5±3.25	2.96±0.1	79.5±5.29
15	4.0	2.0	6.0	0.59±0.03	220.2±10.5	43.17±1.67	2.99±0.27	77.67±7.09
16	4.0	1.7	9.0	0.53±0.02	195.82±21.55	37.75±3.47	2.83±0.11	78.33±3
17	4.0	1.4	12.0	0.44±0.07	217.73±33.48	39.84±0.94	2.83±0.1	85.75±5.51

表4 指标回归方程系数显著性检验结果

Table 4 Indicators regression coefficient significance test results

来源	自由度	p 值 (p Value Prob > F)			
		总酸度/°T	硬度/g	L*值	感官评分
模型	9	0.0068	0.0026	0.0420	0.0003
A	1	0.2287	0.4918	0.0061	0.0003
B	1	0.0004	0.3855	0.3993	0.0014
C	1	0.0119	0.2255	0.9379	0.2392
AB	1	0.0309	0.0012	0.6665	0.0226
AC	1	0.2538	0.0005	0.0202	0.0038
BC	1	0.3346	0.0028	0.5788	0.0176
A ²	1	0.8377	0.6463	0.1280	<0.0001
B ²	1	0.1328	0.2067	0.0325	0.1697
C ²	1	0.3230	0.0870	0.4235	0.0442
失拟项	3	0.5738	0.1094	0.4265	0.1940

注: $p < 0.05$ 时影响显著; $p < 0.01$ 时影响极显著。

总酸度、硬度、L*值、复水比和感官评分5个考察指标的方差分析显著性检验结果如表4所示,其中总酸度、硬度、感官评分3个指标的回归方程模型均极显著 ($p < 0.01$), L*值指标的回归方程模型显著 ($p < 0.05$), 失拟项均不显著 ($p > 0.05$), 且总酸度、硬度、感官评分3个回归方程的决定系数 R^2 均大于0.9, 说明其应变量与自变量之间的多元回归关系显著, 即试验数据与回归方程模型的拟合程度高, 数据

比较可靠, 可用于对干豇豆浸泡腌渍工艺指标进行分析和预测。但是复水比指标的回归方程模型则不显著, 说明复水比受食盐、醋酸、白砂糖浓度的影响不显著, García-Segovia 等^[13]通过研究不同干燥方式下的蘑菇的复水过程, 发现在一定溶液组成比例下, 发现其复水效果与温度和压力相关性最大。

由于本研究采用复水与腌渍工艺相结合, 复水效果就成为了腌渍工艺的关键因素之一, 决定了产品的口感和品质, 复水的过程受到内在和外在因素的影响, 内在因素主要包括化学成分、干燥处理、产品组成等, 外在因素主要包括复水溶液的组成、温度、压力等^[14], 其中最重要的影响因素是复水温度, 温度过高时会使得产品中酚类化合物大量损失, 并导致组织结构和组成改变^[15,16]。因此, 本实验采用常温常压浸泡复水腌渍工艺, 可防止热水浸泡时间过长而使组织过度软化, 通过响应面实验回归方程模型分析, 发现复水比指标的回归方程模型则不显著, 可能是由于考虑到豇豆制品的可食用性, 本实验选取的醋酸、白砂糖、食盐比例适中, 变化幅度较窄, 说明本研究选定的醋酸、白砂糖、食盐比例对豇豆复水效果的影响不显著。因此在接下来的单目标优化分析、影响因子间的交互作用分析以及多目标优化分析中以总酸度、硬度、感官、L*值4个响应值作为评价指标。

各因子对豇豆总酸度影响的大小依次是 $B > C > A$, 其中醋酸 B 的影响达到极显著 ($p < 0.01$), 白砂糖 C

达到显著水平 ($p < 0.05$), 交互作用项 AB 影响显著 ($p < 0.05$); 各因子对豇豆硬度影响的大小依次是 $C > B > A$, 其中交互作用项 AB、AC、BC 影响达到极显著 ($p < 0.01$); 各因子对豇豆 L^* 值影响的大小依次是 $A > B > C$, 其中食盐 A 的影响达到极显著 ($p < 0.01$), B^2 、交互作用项 AC 影响显著 ($p < 0.05$); 各因子对豇豆感官评定影响的大小依次是 $A > B > C$, 其中食盐 A、醋酸 B、交互作用项 AC 的影响达到极显著 ($p < 0.01$), C^2 、交互作用项 AB、BC 影响显著 ($p < 0.05$), A^2 的影响达到极显著水平 ($p < 0.0001$)。

通过结合感官评价, 确定总酸度和硬度适宜、 L^* 值和感官评分越高产品质量越好, 通过 Design Expert 软件对总酸度、硬度、感官、 L^* 值 4 个影响显著的考察指标进行单目标优化, 结果见表 5。单目标优化的最佳条件如表 5 所示, 其中食盐条件一致均为 4.0%, 但醋酸和白砂糖条件各有差异, 各单目标最优值为总酸度 0.56、硬度 219.95 g、 L^* 值 43.88、感官评分 86.06 分。

表5 单目标优化结果

Table 5 Result of single targets' optimization

目标	食盐/%	醋酸/%	白砂糖/%	目标优化值
总酸度/°T	4.0	1.7	9.0	0.56
硬度/g	4.0	1.4	12.0	219.95
L^*	4.0	2.0	10.16	43.88
感官评分	4.0	1.4	11.51	86.06

2.3 影响因子间的交互作用分析

由上述得出的交互项对豇豆总酸度、硬度、 L^* 和感官评分指标具有显著影响的 3D Surface 图如 1~4 所示。各图是由响应值与各试验因子构成的曲面图, 显示了食盐、醋酸和白砂糖浓度中任意一个变量取零水平时, 其余两个变量对考察指标的影响。

图 1 为白砂糖比例 9% 时, 醋酸和食盐比例分别对豇豆总酸度和硬度的交互作用, 由图可知, 当食盐浓度一致时, 随着醋酸浓度的升高, 豇豆的总酸度不断升高; 当食盐浓度在低于 4% 时且一定时, 随着醋酸浓度的升高, 豇豆的硬度不断下降; 当食盐浓度在高于 4% 时且一致时, 随着醋酸浓度的升高, 豇豆的硬度不断升高。

图 2a 为醋酸浓度 1.7% 时, 白砂糖和食盐浓度对豇豆硬度的交互作用。图 2b 为食盐浓度 4%, 白砂糖和醋酸浓度对豇豆硬度的交互作用。由图中可以看出, 当白砂糖浓度小于 9% 且一定时, 硬度随着食盐浓度的升高而降低, 随着醋酸浓度的升高而升高; 而当白砂糖浓度大小 9% 且一定时, 硬度随着食盐浓度的升高而升高, 随着醋酸浓度的升高而降低。

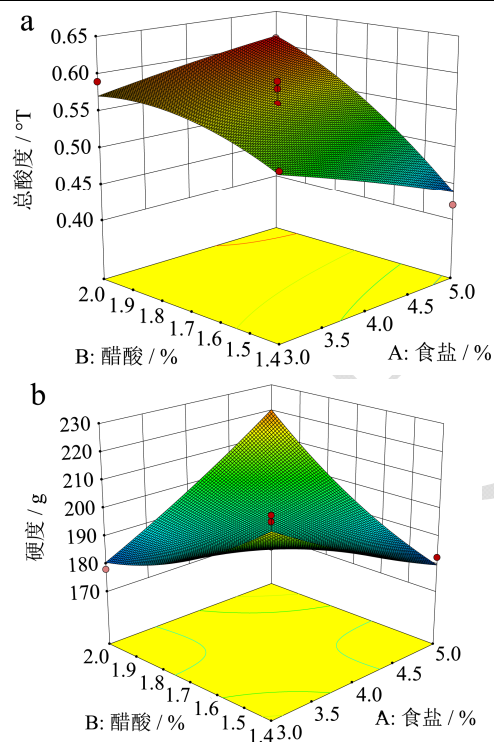


图1 AB交互作用对豇豆总酸度和硬度的影响

Fig.1 Effects of AB mutual interactions on the total acidity and hardness of cowpea

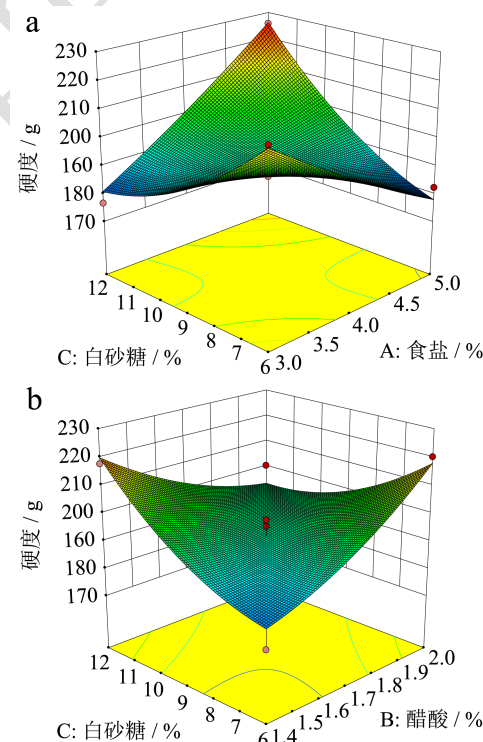


图2 AC交互作用(a)和BC交互作用(b)对豇豆硬度的影响

Fig.2 Effects of AC mutual interactions and BC mutual interactions on the hardness of cowpea

图 3 为醋酸浓度 1.7% 时, 白砂糖和食盐浓度对豇豆 L^* 值和感官评分的交互作用。由图中可以看出, 当白砂糖浓度一定时, L^* 值随着食盐浓度的升高而升

高, 感官评分随着食盐浓度的升高先升高后下降。

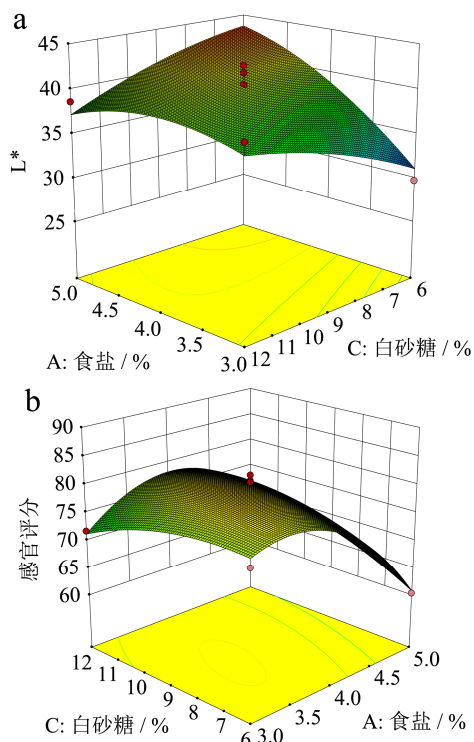


图3 AC交互作用对豇豆L*和感官评分的影响

Fig.3 Effects of AC mutual interactions on the L* and sensory evaluation of cowpea

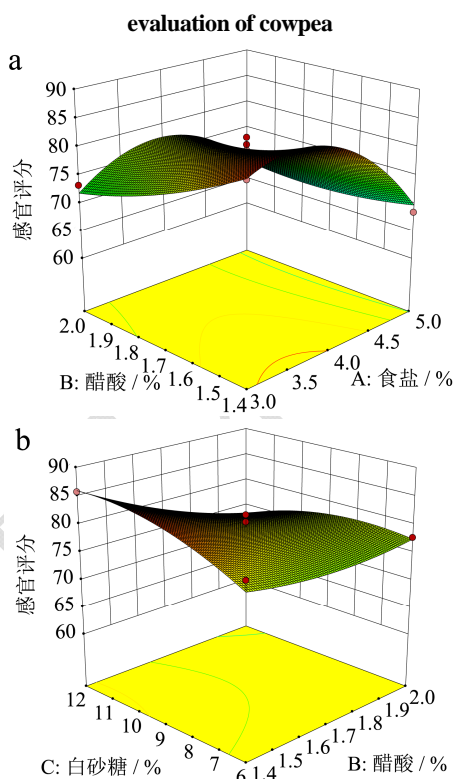


图4 AB交互作用(a)和BC交互作用(b)对豇豆感官评分的影响

Fig.4 Effects of AB mutual interactions and BC mutual interactions on the sensory evaluation of cowpea

图4a为白砂糖浓度9%时, 醋酸和食盐浓度对豇豆感官评分的交互作用, 由图中可以看出, 当醋酸浓

度一定时, 感官评分随着食盐浓度的升高而先升高后降低, 当食盐浓度一定时, 感官评分随着醋酸浓度的升高而降低。图4b为食盐浓度4%, 白砂糖和醋酸浓度对豇豆感官评分的交互作用, 当白砂糖浓度一定时, 感官评分随着醋酸浓度的升高而降低。

通过以上交互作用分析, 可得知感官评分的提高需要以酸度、硬度、L*值的降低为代价, 酸度的升高需要以硬度的降低作为代价, 统计上称这样解为非劣解或 Pareto 最优解, 这就需要通过多目标优化算法来寻找酸度、硬度、L*值、感官评分等指标的最优解。

2.4 熵权法多目标优化结果

熵权法是常用的一种客观赋权法^[17], 利用样本数据信息确定权重, 其优点是不掺杂主观判断, 更科学的进行多指标的综合评价^[18]。根据上述响应面实验结果, 利用熵权法对各个响应值赋权值, 计算得到总酸度、硬度、L*值、感官评分的权重系数分别为 0.1022、0.3229、0.2332、0.3417, 得到的综合评分 Z 如表 6。

通过采用 Design Expert 软件对综合评分 Z 进行回归处理, 得到熵权法综合评分 Z 对食盐 A、醋酸 B 和白砂糖 C 的二次多项式回归方程见式 (10):

$$Z=186.20647+34.70080A-300.22837B+12.37188C+30.05322AB+1.49835AC-6.63525BC-12.59399A^2+70.54859B^2-0.38479C^2(R^2=0.8841) \quad (10)$$

综合评分 Z 的回归方程显著 ($p<0.05$), 失拟项不显著 ($p>0.05$), 且均方差的纯误差较小, 说明此回归方程比较可靠, 可用于干豇豆浸泡腌渍工艺优化综合评分值的分析预测。由 p 值可知, 各因素对浸泡腌渍工艺配方的综合评分 Z 的影响大小依次为: 食盐 A>白砂糖 C>醋酸 B。

应用 Design-Expert 软件对综合评分 Z 影响指标进行优化, 得到熵权法综合评分优化的最佳条件为食盐 4%、醋酸 1.4%、白砂糖 11.8%, 预测得到各目标最优值为总酸度 0.44、硬度 217.81g、L*值 41.03、感官评分 86.03 分, 与单目标优化的结果较为接近。

2.5 最佳工艺参数的验证

对上述熵权法多目标优化得到的最佳条件: 食盐 4%、醋酸 1.4%、白砂糖 11.8%进行验证试验, 在此条件下, 浸泡腌渍豇豆制品的总酸度 0.44、硬度 217.03 g、L*值 42.31、复水比 2.94、感官评分 85.29 分, 与理论预测值接近, 在该参数下所得的豇豆腌渍制品复水较好、形态完整无明显薄膜、色泽深绿明亮、风味较好、组织软硬适中, 感官评价可接受度高, 说明熵权法多目标优化用于干豇豆浸泡腌渍工艺具有较好的准确性

和可靠性, 可为后续研究及工业化生产提供一定的参考依据。

表6 熵权法优化数据标准化结果及综合评分表

Table 6 Standardized data and comprehensive scores by entropy weight method

序号	Y ₁ (总酸度)	Y ₂ (硬度)	Y ₃ (L*值)	Y ₅ (感官评分)	Z (综合评分)
1	0.0000	0.0173	0.2167	0.1105	34.4540
2	0.0914	0.0169	0.1966	0.0000	30.4924
3	0.0753	0.1003	0.0000	0.2110	38.6612
4	0.0592	0.0030	0.1464	0.1548	36.3328
5	0.0861	0.0266	0.1883	0.2713	57.2309
6	0.0753	0.0608	0.1888	0.1521	47.6938
7	0.0592	0.1057	0.1090	0.3182	59.2094
8	0.1022	0.0934	0.2332	0.1139	54.2630
9	0.0914	0.0066	0.1562	0.1753	42.9545
10	0.0538	0.0000	0.2178	0.2691	54.0648
11	0.0753	0.0544	0.1346	0.2432	50.7436
12	0.0645	0.0345	0.2008	0.2881	58.7911
13	0.0430	0.1222	0.1388	0.1574	46.1443
14	0.0914	0.0384	0.1678	0.2579	55.5486
15	0.0914	0.1086	0.2094	0.2345	64.3902
16	0.0592	0.0487	0.1249	0.2423	47.5099
17	0.0108	0.1026	0.1575	0.3417	61.2553

表7 熵权法综合评分响应面回归模型方差分析

Table 7 Analysis of variance of entropy weight method comprehensive score response surface regression model

项目	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	1433.71	9	159.30	5.94	0.0142	显著
A	17.42	1	17.42	0.65	0.4470	
B	0.013	1	0.013	4.71×10 ⁻⁴	0.9833	
C	1.82	1	1.82	0.068	0.8020	
AB	325.15	1	325.15	12.11	0.0103	
AC	80.82	1	80.82	3.01	0.1263	
BC	142.65	1	142.65	5.31	0.0546	
A ²	667.83	1	667.83	24.88	0.0016	
B ²	169.75	1	169.75	6.32	0.0401	
C ²	50.50	1	50.50	1.88	0.2125	
残差	187.89	7	26.84			
失拟项	99.37	3	33.12	1.50	0.3435	不显著
纯误差	88.51	4	22.13			
总和	1621.60	16				

3 结论

本研究以食盐、醋酸、白砂糖为主的复水溶液浸泡腌渍制得调味豇豆制品, 通过采用响应面试验建立二次多项式回归方程模型可用来分析和预测浸泡腌渍工艺对豇豆制品总酸度、硬度、L*和感官评分的影响, 并结合熵权法进行多目标优化最佳工艺, 发现食盐、

醋酸、白砂糖及其交互项对豇豆总酸度、硬度、L*和感官评分指标具有显著影响, 复水比受食盐、醋酸、白砂糖浓度的影响不显著, 各因子对豇豆总酸度影响的大小依次是醋酸>白砂糖>食盐, 其中醋酸的影响极显著, 白砂糖、食盐与醋酸交互作用影响显著; 各因子对豇豆硬度影响的大小依次是白砂糖>醋酸>食盐, 其中食盐与醋酸、食盐与白砂糖及醋酸与白砂糖的交

互作用影响极显著;各因子对豇豆 L^* 值影响的大小依次是食盐>醋酸>白砂糖,其中食盐的影响达到极显著,食盐与白砂糖的交互作用影响显著;各因子对豇豆感官评分影响的大小依次是食盐>醋酸>白砂糖,其中食盐、醋酸、食盐与白砂糖的交互作用影响极显著,食盐与醋酸、醋酸与白砂糖的交互作用影响显著。得到最佳的浸泡盐渍的工艺配方为食盐 4%、醋酸 1.4%、白砂糖 11.8%,通过验证试验得到浸泡腌渍豇豆制品的总酸度 0.44、硬度 217.03 g、 L^* 值 42.31、复水比 2.94、感官评分 85.29 分。

参考文献

- [1] 黎庭耀,李桂花,陈汉才,等.不同豇豆品种资源的营养品质分析[J].广东农业科学,2017,44(4):32-37
LI Ting-yao, LI Gui-hua, CHEN Han-cai, et al. Nutritional quality analysis of different varieties of cowpea [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2017, 44(4): 32-37
- [2] Awika J M, Duodu K G. Bioactive polyphenols and peptides in cowpea (*Vigna unguiculata*) and their health promoting properties: a review [J]. Functional Foods, 2017, 38: 686-697
- [3] Kirigia Dinah, Winkelmann Traud, Kasili Remmy, et al. Development stage, storage temperature and storage duration influence phytonutrient content in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) [J]. Heliyon, 2018, 4(6): e00656
- [4] LV Wei-qiao, LI Dong, LV Hao, et al. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 59-67
- [5] 田坤.酱脆萝卜皮工艺化研究[D].长沙:湖南农业大学,2019
TIAN Kun. Study on the production technology of the sauce crisp radish [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019
- [6] Bao Rui, Fan Aiping, Hu Xiaosong, et al. Effects of high pressure processing on the quality of pickled radish during refrigerated storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38(A): 206-212
- [7] 王妨.酱脆萝卜生产工艺及质量控制研究[D].海口:海南大学,2012
WANG Fang. Study on the production technology and quality control of the sauce crisp radish [D]. Haikou: Hainan University, 2012
- [8] 梁莉,杜阿如娜,马涛,等.低盐豇豆泡菜预处理工艺优化及贮藏特性分析[J].食品科学,2018,39(6):246-251
LIANG Li, DU Aruna, MA Tao, et al. Optimized pre-treatment and storage properties of low-salt pickled cowpea [J]. Food Science, 2018, 39(6): 246-251
- [9] 徐柯,成林林,袁美,等.泡豇豆发酵过程中有机酸变化及对亚硝酸盐降解的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(17):60-65
XU Ke, CHENG Lin-lin, YUAN Mei, et al. The changes of organic acids during pickled cowpea (*Vigna sinensis*) fermentation and its degradation effect on nitrite [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(17): 60-65
- [10] GB 5009.239-2016,食品酸度的测定 中华人民共和国国家标准[S]
GB 5009.239-2016, Determination of Acidity in Food, National Standard of the People's Republic of China [S]
- [11] 高鹤,易建勇,刘璇,等.响应面法优化番木瓜变温压差膨化干燥工艺[J].食品科学,2014,35(24):51-56
GAO He, YI Jian-yong, LIU Xuan, et al. Optimization of explosion puffing drying process for papaya at variable temperatures and pressure difference [J]. Food Science, 2014, 35(24): 51-56
- [12] 库晓,钱杨,李娅琳,等.不同品种豇豆发酵过程中质构品质变化及产植物细胞壁降解酶微生物种类分析[J].食品工业科技,2019,40(2):1-7
SHE Xiao, QIAN Yang, LI Ya-lin, et al. Texture changes and plant cell wall degrading enzymes producing microorganism diversity in different varieties of cowpea during fermentation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(2): 1-7
- [13] García-Segovia P, Andrés-Bello A, Martínez-Monzó J. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes [J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(2): 480-488
- [14] Antonio V, E. A. Notte-Cuello, Roberto L, et al. Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(4): 254-260.
- [15] Cox S, Gupta S, Abu-Ghannam N. Effect of different rehydration temperatures on the moisture, content of phenolic compounds, antioxidant capacity and textural properties of edible Irish brown seaweed [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 47(2): 300-307
- [16] 宋晓东,钟昔阳,胡喜萍,等.恒温及变温复水方式对脱水蔬菜品质及复水动力学的影响[J].食品科技,2019,44(7):128-134
SONG Xiao-dong, ZHONG Xi-yang, HU Xi-ping, et al. Effect of constant-/variable-temperature rehydration on the quality and rehydration kinetics of *Osmunda japonica* [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(7): 128-134

(下转第146页)