DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251231001
引用格式: 干莉娜, 叶婉秋, 梁孟佳, 等. 响应面法优化腐竹生产工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 237–244.
GAN LN, YE WQ, LIANG MJ, *et al*. Research on production process optimization of bean curd stick by response surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 237–244. (in Chinese with English abstract).

响应面法优化腐竹生产工艺研究

干莉娜[1], 叶婉秋[1], 梁孟佳[1], 樊春燕[2], 孟宪福[1*]

(1. 广西生态工程职业技术学院, 柳州 545000; 2. 北海海关综合技术服务中心, 北海 536100)

摘 要: 目的 研究腐竹生产关键工艺参数对产品质量的影响, 优化腐竹生产技术。**方法** 针对腐竹生产工艺关键控制点开展单因素试验并依据其结果设计响应面试验, 研究工艺参数调整对产品感官变化和机械性能的影响, 以感官评分(60%)、断裂延伸率(20%)和抗拉伸强度(20%)构成的综合评分为响应面值, 优化腐竹生产工艺技术。**结果** 确立腐竹生产的最优工艺为磨浆豆水质量比 1:7.3, 浆液 pH 8.16, 低亚硫酸钠添加量为豆浆质量的 0.037%, 通过验证, 该条件下生产的腐竹色泽鲜亮, 豆香浓郁, 咀嚼性能好, 二氧化硫残留量为 0.10 g/kg, 符合食品安全要求。**结论** 经优化的工艺技术可为腐竹的加工提供可靠的技术支撑。

关键词: 腐竹; 工艺; 响应面法

Research on production process optimization of bean curd stick by response surface method

GAN Li-Na[1], YE Wan-Qiu[1], LIANG Meng-Jia[1], FAN Chun-Yan[2], MENG Xian-Fu[1*]

(1. *Guangxi Eco-engineering Vocational & Technical College*, *Liuzhou* 545000, *China*;
2. *Beihai Customs Comprehensive Technical Service Center*, *Beihai* 536100, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of key processing parameters on product quality during bean curd stick production, and optimize the processing technology. **Methods** Single-factor experiments were carried out for the critical control points of bean curd stick production, and response surface experiments were designed according to the results. The effects of processing parameters on sensory properties and mechanical properties of bean curd stick were studied. The comprehensive score, composed of sensory score (60%), elongation at break (20%) and tensile strength (20%), was used as the response value, and the production process was optimized. **Results** The optimal processing conditions of bean curd stick production were determined as follows: Soybean-to-water mass ratio of 1:7.3, slurry pH 8.16 and sodium hydrosulfite addition of 0.037% based on soybean milk weight. Verification tests showed that bean curd stick produced under these conditions had bright color, strong beany flavor and good chewiness. The sulfur dioxide residue was 0.10 g/kg, which met food safety

收稿日期: 2025-12-31
基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(2023AB01295); 校级课题项目(2024KY25)
第一作者: 干莉娜(1982—), 女, 硕士, 教授/高级工程师, 主要研究方向为特色食品开发及质量控制。E-mail: 35983413@qq.com
***通信作者:** 孟宪福(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为生物发酵及生物工程领域综合应用。E-mail: glmxf@aliyun.com

requirements. **Conclusion** The optimized processing technology provides reliable technical support for the industrial production of bean curd stick.

KEY WORDS: bean curd stick; process; response surface method

0 引 言

腐竹是我国非发酵豆制品的典型代表, 蛋白质含量高达 52%~57%, 是植物基蛋白的重要来源, 其营养成分丰富且含量较高[1], 深受消费者喜欢。腐竹传统制作工艺通常采用高温连续揭竹方式进行, 豆浆中游离氨基酸和还原糖的存在, 美拉德反应导致生产前端与后端产品色差明显[2], 生产过程中通常添加漂白剂解决该问题。按照 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》规定, 腐竹中可以添加的漂白剂有亚硫酸氢钠、亚硫酸钠、低亚硫酸钠、焦亚硫酸钠等, 低亚硫酸钠具有较强的还原性和较好的漂白效果而应用较多[3]。近年也有一些关于二氧化硫超标的报道, 为了使腐竹光亮好看, 在生产中过量添加低亚硫酸钠, 也有一些小企业没有把握好动态揭竹过程中二氧化硫的变化动态, 导致残留二氧化硫超标而食品安全风险增加[4]。

低亚硫酸钠的添加不仅影响腐竹的感官, 而且对其质构产生影响, 亚硫酸盐类通过裂解蛋白质的二硫键或阻断蛋白质二硫键的形成影响腐竹的机械性能[5]及贮存期[6], 因此腐竹抗拉伸强度及断裂延伸率是考量腐竹品质的重要指标[7−9]。研究表明大豆持水量对腐竹的产量及色泽有显著影响[10], 在实际生产中, 低亚硫酸钠的添加量在兼顾感官与二氧化硫残留两项之间往往顾此失彼, 但是鲜见关于亚硫酸盐类对腐竹感官和机械性能影响的综合研究报道。因此, 本研究以腐竹生产关键控制要素大豆持水量、豆水质量比、浆液 pH 及低亚硫酸钠的添加量为研究对象, 考察其对腐竹感官、抗拉伸强度及断裂延伸率的影响, 兼顾感官与机械性能的提升, 以期为腐竹生产提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆: 市售。

低亚硫酸钠(食品级, 江苏瑞多生物工程有限公司)。

1.2 仪器与设备

PB12Easy 219 破壁机(美的集团股份有限公司); HM-20L 搅拌机(山东诸城市众康机械制造有限公司); TG-328A 分析天平(精度 0.1 mg, 上海精密科学仪器有限公司); HH-6 六孔电热恒温水槽(常州国华电器有限公司); 101-1ABS 干燥箱(北京市永光明医疗仪器厂); TA-XT.Plus 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程及关键点

工艺流程及关键参数参照赵秋艳等[7]的方法进行, 工艺流程: 大豆→清洗→浸泡→磨浆→煮浆→滤浆→加添加剂(低亚硫酸钠)→揭竹→干燥→包装→成品。

腐竹制作工艺要点: (1)浸泡。将大豆用纯化水浸泡, 使得豆瓣手掐易断即可。(2)磨浆。以干豆质量为基准, 加数倍水充分磨浆。(3)煮浆滤浆。煮浆易起泡, 加干豆质量 0.05%的消泡剂, 煮 10~15 min 随即过滤。(4)添加添加剂。将低亚硫酸钠溶于少量水, 然后倒入豆浆混匀。(5)揭竹。将煮熟的豆浆倒入广口容器中, 在 90 ℃时揭竹, 间隔 20~25 min 挑起, 沥干。(6)烘干。将腐竹置于 65 ℃的烘箱中干燥, 至水分 12%以下。

1.3.2 腐竹工艺优化单因素试验

本研究腐竹加工基本方法为: 大豆 2000 g、加水 8 L 浸泡, 大豆持水后达到 3000 g、滤除水后再添加 24 L 水磨浆、调节 pH 8.0、煮浆沸 10 min 后用滤布过滤、加入豆浆质量 0.04%的低亚硫酸钠, 然后揭竹, 烘干。

浸泡过程中大豆的持水量、磨浆的浓度、浆液 pH、低亚硫酸钠的添加量等均对腐竹的感官、抗拉伸强度及断裂延伸率产生影响。腐竹生产的动态揭竹过程中, 其感官、抗拉伸强度及断裂延伸率会随揭竹次数变化, 本研究采用中间段第 4 次揭竹的产品进行评价。

(1)大豆持水量。按照 1.3 的方法, 大豆浸泡后质量分别为原质量的 1.3、1.4、1.5、1.6 和 1.7 倍, 评价其指标。

(2)豆水质量比。豆水质量比分别按照 1:5、1:6、1:7、1:8 和 1:9 (*m*:*m*)的比例加水磨浆, 评价其指标。

(3)浆液 pH。将豆浆 pH 分别设定为 7.0、7.5、8.0、8.5 和 9.0, 其他因素相同, 评价其指标。

(4)低亚硫酸钠。设定低亚硫酸钠的添加量为豆浆质量的 0.02%、0.04%、0.06%、0.08%和 0.10%。其他条件一致, 评价其指标。

1.3.3 响应面试验

根据单因素试验的结果, 选择豆水质量比、浆液 pH 和低亚硫酸钠的添加量并设置 3 个水平, 按表 1 进行响应面试验设计, 按照 1.3.1 基本工艺试验。抗拉伸强度及断裂延伸率是腐竹的重要指标, 因此综合考虑机械性能与产品感官因素, 本研究采用综合评分进行评价, 感官评

分总分 60 分, 抗拉伸强度和断裂延伸率各 20 分, 以最优指标为满分按比例折算。综合评分为感官评分、抗拉伸强度和断裂延伸率评分之和。

表 1　因素水平表
Table 1　Table of factors and levels

水平	因素		
	A(豆水质量比)(*m*:*m*)	*B*(浆液 pH)	*C*(低亚硫酸钠的添加量)/%
1	1:6	7.5	0.03
2	1:7	8.0	0.04
3	1:8	8.5	0.05

1.3.4　感官评价方法

采用向凤兰等[11]的评价方法并适当改进, 由 10 人按评分标准(表 2)分别评定, 取平均值作为感官评分。

表 2　感官评分标准
Table 2　Criteria for sensory test scoring

评价指标	评价要点	得分/分
颜色及光泽(20 分)	表面有光泽, 颜色鲜亮淡黄	16~20
	颜色、光泽度稍差, 为浅色亮黄或泛洁白, 清白色	11~15
	颜色稍暗, 略有光泽, 黄中稍带浅褐色, 色泽不均	7~10
	颜色黯淡, 无光泽, 呈灰黄色或红褐色, 且色泽不均	0~6
口感(20 分)	韧性佳, 口感极好	15~20
	韧性一般, 有一定的拉伸性能, 口感一般	8~14
	韧性差, 易断裂, 口感极差	0~7
气味(20 分)	有浓厚的大豆本身气味, 无异味	15~20
	有一定的大豆本身气味, 略有异味	8~14
	无大豆本身气味, 异味较重	0~7

1.3.5　腐竹抗拉伸强度及断裂延伸率的测定

采用赵秋艳等[7]的方法进行测定。将干燥后的腐竹样品裁剪为 6 cm×2 cm 的长条, 采用质构仪进行拉伸性能测定。测试条件: 初始夹具间距 20 mm, 拉伸速度 1 mm/s, 触发力 0.1 N。每组测定 6 次平行样, 记录最大断裂力与断裂时的延伸长度。

1.3.6　综合评分计算

抗拉伸强度和断裂延伸率分别按其最大值计 20 分, 实际得分按其实测值占最大值比例赋分, 即: 实际得分=(实测值/最大值)×20; 综合评分为感官评分、抗拉强度评分和断裂延伸率评分之和。

1.4　数据处理

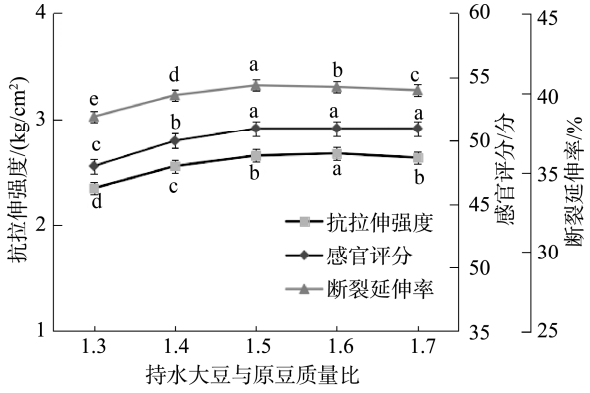
单因素数据由 Microsoft Excel 2007 绘图并分析, 响应面数据由软件 Design-expert 13 分析。各试验均开展 3 次平行试验。

2　结果与分析

2.1　单因素试验

2.1.1　大豆持水量对腐竹感官评价及机械性能的影响

从图 1 可以发现, 总体上腐竹的感官评分, 抗拉伸强度及断裂延伸率均随着大豆持水量的增加而增加, 且在大豆持水质量达到原豆质量 1.5 时, 感官评分和断裂延伸率达到最大值且之后 3 项指标基本保持平稳。随着浸泡水量的增加, 所产腐竹颜色略浅, 吸水对大豆物质释放有影响[12], 可能是大豆浸泡水量的增加, 水中可溶性糖的质量会增加, 减少美拉德反应的底物, 有利与改善腐竹的色泽[10]。经单因素显著性差异分析, 大豆持水量对感官评分、抗拉伸强度及断裂延伸率有显著影响(P<0.05), 但其达到 1.5 之后基本保持平稳。所以, 综合考虑大豆持水后质量达到 1.5 倍即可。



注: 同一指标不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 图 2~4 同。
图 1　大豆持水量对腐竹感官及机械性能的影响
Fig.1　Influences of water holding capacity of soybeans on the sensory and mechanical properties of bean curd stick

2.1.2　豆水质量比对腐竹感官评价及机械性能的影响

从图 2 可知, 感官评分随豆浆浓度增加呈现先增加后降低态势, 豆水质量比达到 1:8 时最优, 豆浆过浓时腐竹颜色较深且较硬, 豆浆浓度逐渐变稀, 腐竹颜色得到改善且韧性较好, 但过稀则口感变差, 韧性降低; 抗拉伸强度则随着浓度降低而逐渐降低, 这是因为豆浆中蛋白含量降低导致其形成网络交联程度减弱[13–16], 抗拉强度降低; 断裂延伸率先增后减, 豆浆较浓时, 产品较硬不易延伸, 豆浆较稀时, 腐竹较薄易断。经单因素显著性差异分析, 豆水质量比对感官评分, 抗拉伸强度及断裂延伸率均产生显著影响(P<0.05)。综合考虑, 以断裂延伸率较

好的豆水质量比 1:7 开展后续试验。

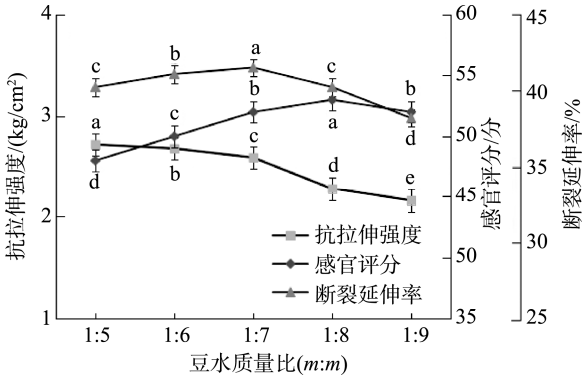


图 2 豆水质量比对腐竹感官及机械性能的影响

Fig.2 Influences of bean-water quality ratio on sensory and mechanical properties of bean curd stick

2.1.3 煮浆时间的对腐竹感官评价及机械性能影响

从图 3 中可以发现，腐竹的感官评分、抗拉伸强度及断裂延伸率均随 pH 的增加先增加后降低，在 pH 为 8.0 时，同时出现了最大值。随着 pH 的升高，腐竹色泽由淡黄逐渐变亮，当 pH=8.0 时，腐竹呈现亮黄且有光泽，再升高 pH，则出现颜色加深至褐色，而当 pH 超过 8.0 达到 9.0 时，大豆蛋白变得增溶，也可能离解，不利于成膜，腐竹没有韧性，且美拉德反应加剧。这是因为较高的 pH 有助于蛋白质舒展，提高结合率[17−18]。经单因素显著性差异分析，豆浆 pH 对感官评分，抗拉伸强度及断裂延伸率均产生显著影响(P<0.05)。豆浆在 pH 8.0 时所得腐竹较好。

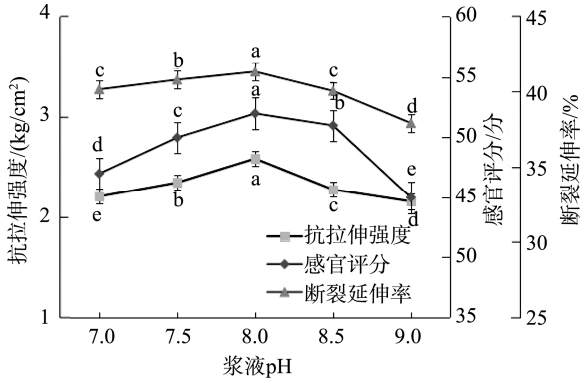


图 3 浆液 pH 对腐竹感官及机械性能的影响

Fig.3 Influences of slurry pH on the sensory and mechanical properties of bean curd stick

2.1.4 低亚硫酸钠的添加量对腐竹感官评价及机械性能的影响

从图4可知，低亚硫酸钠添加 0.04%时感官评分最高，而后随着低亚硫酸钠浓度的增高，当添加量达到 0.08%时，腐竹颜色略发白，影响产品感官。随低亚硫酸钠浓度增加，膜的抗拉伸强度缓增后缓降，在添加量大于 0.06%时，抗拉伸强度下降显著(P<0.05)。断裂延伸率随低亚硫酸钠浓度的增高总体呈下降态势，这可能是低亚硫酸钠较强的还原作用使蛋白分子间的二硫键断裂，蛋白分子结构发生变化[19−20]，进而影响蛋白质溶解度及界面活性所致[21]；经单因素显著性差异分析，低亚硫酸钠添加量对感官评分，抗拉伸强度及断裂延伸率影响显著(P<0.05)。综合考虑，添加量确定 0.04%较好。

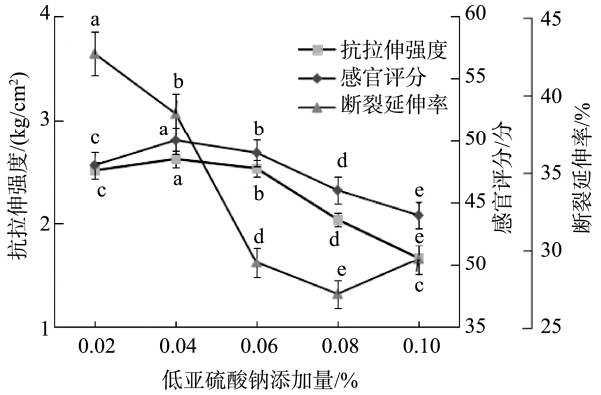


图 4 低亚硫酸钠添加量对腐竹感官及机械性能的影响

Fig.4 Influences of the addition amount of low sodium sulfite on the sensory and mechanical properties of bean curd stick

2.2 响应面试验结果及分析

2.2.1 优化试验

依单因素数据分析，大豆持水量在达到原质量 1.5 倍后，再增加持水量，指标变化不大，则不再考核。选择豆水质量比、浆液 pH 和低亚硫酸钠添加量作为考察因素，单因素设置 3 个水平，开展 3 次平行试验，结果取平均值，见表 3。

使用软件 Design-expert 13 开展分析，对表 4 所得综合评分进行多元回归分析，得到综合评分与各因素关联方程：Y=93.2–0.625A–0.375B–1.5C–0.75AB+3.0AC+0.00BC–3.225A^2–4.755B^2–5.9755C^2。

经对综合评分进行方差分析，表 4 数据显示，模型 P<0.001，表明所设计模型可行，其失拟项不显著，P>0.05，则这一模型拟合程度较好，具有统计学意义。从回归方程可以看出一次项 C 和交互项 AC 对响应值影响显著(P<0.05)。该模型决定系数 R^2(adj)=0.9185，表明其拟合性能较好。回归方程应用于腐竹加工工艺的参数优化和设计，通过各因素 F 的大小可以推断其对综合评分影响的程度，最终发现因素对综合评价的影响依次为：C(低亚硫酸钠添加量)>A(豆水质量比)>B(浆液 pH)。

2.2.2 各因素间交互作用

通常响应面的陡峭程度与交互作用呈正相关[22−23]，由图 5 可知，设置的 C(低亚硫酸钠添加量)、A(豆水质量比)和 B(浆液 pH)交互组在交互作用下形成了响应面，各响应面均

比较陡峭, 且对应的等高线均为椭圆形, 表明 3 个因素的交互作用影响到了对应的综合评分。通过分析得到 3 因素最优水平为: 磨浆豆水质量比为 1:7.3 (*m*:*m*), 浆液 pH 8.16, 低亚硫酸钠添加量 0.037%, 最优工艺感官评分达到 93.14。

表 3　Box-Behnken 设计及评价结果

Table 3　Design and evaluate results of Box-Behnken

序号	*A*(豆水质量比)(*m*:*m*)	*B*(浆液 pH)	*C*(低亚硫酸钠添加量)/%	感官评分	抗拉强度/(kg/cm^2)	断裂延伸率/%	*Y*(综合评分)/分
1	–1	–1	0	50	2.60	35.9	87
2	1	–1	0	49	2.58	34.2	85
3	–1	1	0	50	2.59	35.1	87
4	1	1	0	49	2.08	35.3	82
5	–1	0	–1	48	2.63	40.6	88
6	1	0	–1	49	2.01	37.8	83
7	–1	0	1	50	1.95	28.5	79
8	1	0	1	51	2.51	32.4	86
9	0	–1	–1	47	2.28	40.0	84
10	0	1	–1	48	2.15	39.5	84
11	0	–1	1	49	2.22	30.5	81
12	0	1	1	50	2.20	28.3	81
13	0	0	0	54	2.65	40.4	94
14	0	0	0	53	2.63	39.8	92
15	0	0	0	53	2.61	40.3	93
16	0	0	0	54	2.63	40.0	94
17	0	0	0	55	2.65	40.5	93

表 4　综合评价响应的回归方差分析

Table 4　Regression analysis of variance for comprehensive evaluation of responses

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	379.83	9	42.20	21.03	0.0003	显著
A	3.12	1	3.12	1.56	0.2522	
B	1.12	1	1.12	0.56	0.4785	
C	18.00	1	18.00	8.97	0.0201	*
AB	2.25	1	2.25	1.12	0.3249	
AC	36.00	1	36.00	17.94	0.0039	**
BC	0.00	1	0.00	0.00	1.0000	
A^2	43.79	1	43.79	21.82	0.0023	**
B^2	94.00	1	94.00	46.83	0.0002	**
C^2	150.32	1	150.32	74.89	<0.0001	**
残差	14.05	7	2.01			
失拟项	11.25	3	3.75	5.36	0.0693	不显著
纯误差	2.80	4	0.70			
总差异	393.88	16				

注: *表示该因素对结果影响显著(P<0.05); **表示该因素对结果影响极显著(P<0.01)。

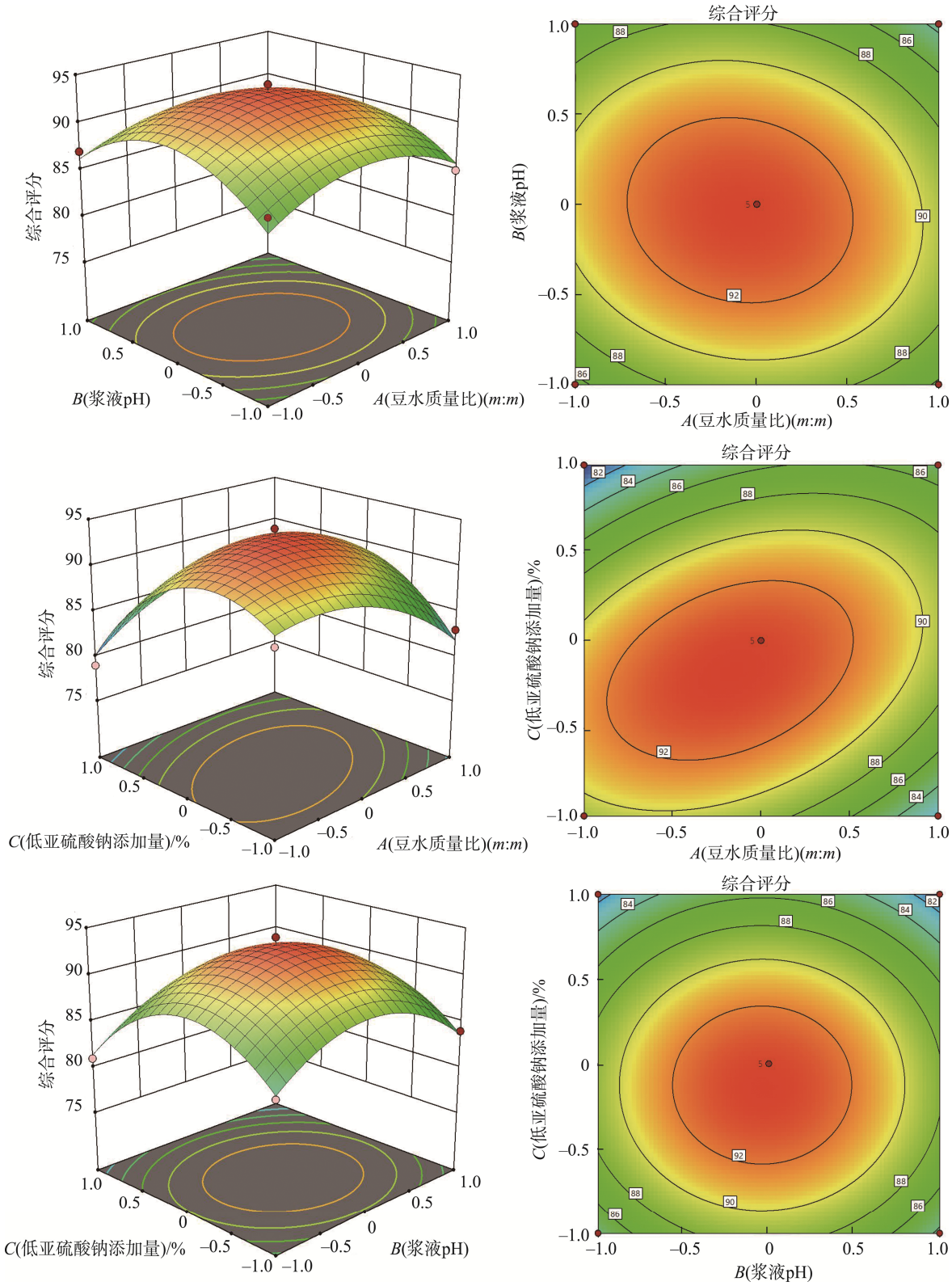


图 5 响应值的响应面图及等高线图

Fig.5 Response surface plots and contour plots of response value

2.3 验证试验

按照最优工艺参数组合平行试验 3 次，从图 6 可以看出，产品各因素评分基本重合，工艺稳定性好，实际综合评分平均值为 93.0，较预测值的差别不明显，充分说明该试验模型具有一定的实用性。此工艺条件生产的腐竹色泽鲜亮，豆香浓郁，咀嚼性能好，食用口感好，产品二氧化硫残留为

0.10 g/kg, 符合食品安全要求。

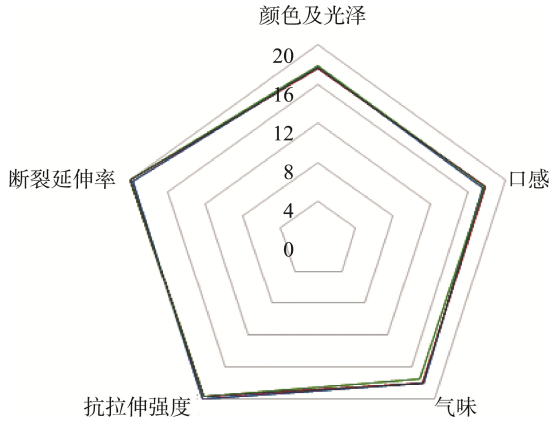


图 6　验证试验评分分布

Fig.6　Distribution of fractions of verification test

3　讨论与结论

导致腐竹产品品质差异的工艺因素较多, 机械化智能化水平不断提高[24], 腐竹加工需要精细化设计[25], 本研究主要从豆水质量比、豆浆 pH、低亚硫酸钠添加量开展。豆水比影响豆浆的浓度, 豆浆浓度由浓变稀, 腐竹颜色由深变浅, 可能是可溶性糖的减少导致美拉德反应底物[26–27], 豆浆浓度高, 增加了蛋白质分子氢键形成几率, 从而提高了抗拉伸强度[17], 抗拉升强度随浓度降低而变小。低亚硫酸钠的还原作用断裂蛋白质分子间的二硫键, 共价二硫键的含量, 而该化学键是影响腐竹断裂延伸率的重要因素[28–31], 随添加量的增加, 腐竹断裂延伸率降低。

经研究, 该腐竹生产工艺的最佳方案为: 大豆浸泡至手掐易断, 子叶掰开无硬心, 呈乳白色, 按豆水质量比为 1:7.3 (*m*:*m*)加水磨浆, 调节 pH 为 8.16, 加入 0.05%(以干豆计)消泡剂煮 10 min 后过滤, 添加低亚硫酸钠 0.037%(以豆浆质量计), 保温在 90 ℃揭竹, 然后在 65 ℃下烘干至水分含量 12%以下。在此工艺参数下所生产的腐竹色泽鲜亮, 豆香浓郁, 咀嚼性能好, 该工艺用于生产腐竹稳定可靠。

本研究以产品感官及机械性能为指标研究了各因素对产品质量的影响, 尚未阐明形成该变化的原因, 后续将进一步研究其质构变化的机制, 为腐竹加工提供更精准的指导。

参考文献

[1] KONG XZ, LI JX, MA XJ, *et al*. Tracking the variation of soy protein composition during yuba preparation and cooking process [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 119: 105278.

[2] 吴成. 多次揭皮对腐皮品质的动态影响研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
WU C. Dynamic effect of multiple film picking on the quality of soybean film [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.

[3] 冯容保. 食品添加剂中漂白剂的应用[J]. 发酵科技通讯, 2000(2): 16–17.
FENG RB. The application of bleaching agents in food additives [J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2000(2): 16–17.

[4] 张旭丽, 曹文成, 刘潇, 等. 湖北省市售典型食品中二氧化硫残留现状及风险分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(6): 1269–1274.
ZHANG XL, CAO WC, LIU X. *et al*. Analysis and risk assessment of sulfur dioxide residue in typical goods in Hubei Province [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1269–1274.

[5] ZHONG MM, SUN YY, SONG HY, *et al*. Dithiothreitol-induced reassembly of soybean lipophilic protein as a carrier for resveratrol: Preparation, structural characterization, andfunctional properties [J]. Food Chemistry, 2023, 399: 133964.

[6] BI J, ZHANG J, CHEN Z, *et al*. Dynamic patterns of quality deterioration, oxidative stability, and flavor evolution in yuba during long-term storage [J]. Food Chemistry, 2025, 29: 102760.

[7] 赵秋艳, 裴琪, 宋莲军, 等. 低亚硫酸钠添加对腐竹品质指标的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(2): 271–279.
ZHAO QY, PEI Q, SONG LJ, *et al*. Effect of sodium hydrosulfite addition on quality indexes of yuba [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(2): 271–279.

[8] CAI QW, ZHANG HX, ZOU WB, *et al*. Directional control of the formation rate, and structural and mechanical properties of yuba films via disulfide bond- or ionic interaction-mediated soy protein aggregation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(11): 5823–5832.

[9] LIU W, TIAN Y, WANG L, *et al*. Novel strategies for Yuba quality improvement: Protein modification based on physical fields [J]. Foods, 2025, 14(6): 1033.

[10] 王凯欣. 浸泡过程中大豆主要成分变化及其对豆浆和腐竹品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
WANG KX. The changes of main components of soybeans during soaking and their effects on the quality of soy milk and tofu skin [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.

[11] 向凤兰, 吴尔文, 陈沛, 等. 大豆品种及油体富集工艺对腐竹品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 10–17, 50.
XIANG FL, WU ERW, CHEN P. Effect of soybean variety and oil enrichment process on the quality of Yuba [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 10–17, 50.

[12] LI X, LIU X, HUA Y, *et al*. Effects of water absorption of soybean seed on the quality of soymilk and the release of flavor compounds [J]. RSC Advances, 2019, 9(6): 2906–2918.

[13] WU C, HUA Y, CHEN Y, *et al.* Effect of temperature, ionic strength and 11S ratio on the rheological properties of heat-induced soy protein gels in relation to network proteins content and aggregates size [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 66: 389–395.

[14] 马春芳, 刘军, 李顺秀, 等. 低温食用豆粕对腐竹加工过程及品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(11): 41–44.
MA CF, LIU J, LI SX, *et al*. The influence of low-temperature edible soybean meal on the processing and quality of bean curd sticks [J].The Food Industry, 2021, 42(11): 41–44.

[15] FU HL, LI JX, YANG XQ, *et al*. The heated-induced gelation of soy protein isolate at subunit level: Exploring the impacts of *α* and *α*' subunits on SPI gelation based on natural hybrid breeding varieties [J]. Food

Hydrocolloids, 2023, 134: 108008.

[16] 李嘉欣. 豆浆蛋白质与脂质组成对腐竹制备和品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
LI JX. Effects of protein and lipid composition of soybean milk on the preparation and quality of rolls of dried bean milk creams [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[17] 蓝伟杰, 林莹, 康庆, 等. 原料组分与工艺条件对腐竹品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 252–258.
LAN WJ, LIN Y, KANG Q, *et al*. Effects of raw material composition and processing conditions on quality of Yuba [J]. Food Science, 2020, 41(16): 252–258.

[18] 谢丽燕, 林莹, 谭瑶瑶, 等. 正交试验优化传统腐竹制作工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 36–40.
XIE LY, LIN Y, TAN YY, *et al*. Optimization of the traditional production process of yuba [J]. Food Science, 2014, 35(2): 36–40.

[19] CHAGAS R, FERREIRA LM, LAIS CAT, *et al*. Thechallenging SO_2-mediated chemical build-up of proteinaggregates in wines [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 460–469.

[20] LANCELOT E, FONTAINE J, GRUA-PRIOL J, *et al*. Study of structural changes of gluten proteins duringbread dough mixing by Raman spectroscopy [J]. FoodChemistry, 2021, 358: 129916.

[21] YANG J, DUAN Y, ZHANG H, *et al*. Ultrasound coupled with weak alkali cycling-induced exchange of free sulfhydryl-disulfide bond for remodeling interfacial flexibilityof flaxseed protein isolates [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108597.

[22] 孟宪福, 覃朝望. 基于响应面法的草莓果酱工艺优化[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 75–80.
MENG XF, QIN CW. Process optimization of strawberry jam based on response surface method [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(6): 75–80.

[23] 封亚星, 王少锋, 李永新, 等. 响应面法优化方便杂粮饭工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 272–279.
FENG YX, WANG SF, LI YX, *et al*. Research on optimizing the process of convenient mixed grain rice by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 272–279.

[24] 陈麒宇. 腐竹机械化生产工艺与装备研究[J]. 中外食品工业, 2024(12): 1–3.
CHENG QY. Research on mechanized production technology and equipment of Tofu skin [J]. Global Food Industry, 2024(12):1–3.

[25] SHEN YJ, TAO YH, TANG QS, *et al*. Study on multifactor control experiment and design of quality detection system for Yuba skin production [J]. Mobile Information Systems, 2022(1): 1–13.

[26] GONZÁLEZ A, BARRERA NG, GALIMBERTI IP, *et al*. Development of edible films prepared by soy protein and the galactomannan fraction extracted from *Gleditsia triacanthos* (Fabaceae) seed [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105227.

[27] 王俊彤, 孙嘉辉, 郑喜群, 等. 揭膜过程中绿豆腐竹品质特性的迁移变化[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2025, 37(4): 54–60, 124.
WANG JT, SUN JH, ZHANG XQ, *et al*. Migration changes of quality characteristics of mung bean yuba during film uncovering [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural, 2025, 37(4): 54–60, 124.

[28] 宋一丹. 揭竹过程中浆液成分的迁移变化及对成膜特性的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
SONG YD. Migration and change of soybean milk compositionduring film formation and its influence on film-forming [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.

[29] 李嘉欣, 马潇杰, 兰欣, 等. 豆粕陈化对大豆蛋白结构性质及腐竹制备的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(4): 103–109, 131.
LI JX, MA XJ, LAN X. Effect of soybean meal aging on the structure properties of soybean protein and the preparation of yuba [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(4): 103–109, 131.

[30] 郭星星, 赵秋艳, 赵瑞芳, 等. *L*-半胱氨酸对揭竹过程中腐竹品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(21): 235–242.
GUO XX, ZHAO QY, ZHAO RF, *et al*. Effect of *L*-cysteine on quality of yuba during process of unveiling [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(21): 235–242.

[31] 宋怡倩, 李力, 王晓曦, 等. 植物蛋白基薄膜研究进展以及在果蔬保鲜应用[J]. 粮食科技与经济, 2024, 49(6): 103– 109.
SONG YQ, LI L, WANG XX, *et al*. Advances in plant protein-based films and application in fruit and vegetable preservation [J]. Food Science and Technology and Economy, 2024, 49(6): 103–109.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)