

模糊综合评价结合响应面法优化鹰爪虾滑加工工艺

朱 凯¹, 郑飞洋¹, 郭丽平¹, 张益奇^{1,2}, 卢延斌^{1,2}, 戴志远^{1,2*}

(¹浙江工商大学海洋食品研究院 杭州 310012)

(²浙江省水产品加工技术研究联合重点实验室 杭州 310012)

摘要 以鹰爪虾和南美白对虾为原料,研究不同漂洗工艺对虾滑凝胶性能的影响,并对虾滑配方进行优化。以凝胶强度、弹性和胶黏性为指标,得出虾肉较优的漂洗参数为水料质量比 11:1,漂洗时间 7 min。以虾滑感官评分为指标,利用模糊综合评价法和响应面法得出虾滑最优配方为:马铃薯淀粉添加量 5.6%、白虾-鹰爪虾的粒糜比 0.25:1、食盐添加量 1.9%。由此制得的虾滑口感爽滑、鲜味十足,感官评分 8.58 分。本研究成果可为高品质虾滑类制品加工工艺的完善提供数据支撑。

关键词 鹰爪虾;模糊综合评价;响应面法;加工工艺

文章编号 1009-7848(2022)02-0224-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.02.024

为获取优质蛋白,人类对于鱼类食品的青睐由来已久,如今全球渔获量的增长已无法跟上消耗速度的急剧增加,因此转而寻找更多的蛋白质来源。虾,最初是作为鲸鱼等海洋动物的食物而被世人所知晓,如今凭借其出众的营养价值而被人类接受成为食品^[1]。我国水域辽阔,拥有得天独厚的渔业优势,2019 年我国虾的总产量约 587 t,达到甲壳类总产量的 77.3%;各类虾,如南美白对虾、斑节对虾、中国对虾、罗氏沼虾、青虾和克氏原螯虾等皆有出产^[2]。相较于丰富的虾资源,我国的虾产品深加工能力却处于初级阶段,以南美白对虾为例,除了鲜食外,大多用于冷冻加工,加工方式单一^[3]。虾滑是利用浓缩的肌原纤维蛋白(MPs)相互交联形成具有空间网状结构的凝胶^[4],具有良好的口感和风味,受到消费者的青睐。目前市场上流通的虾滑类产品主要使用南美白对虾、日本沼虾(青虾)以及鱿鱼、鱼糜等材料制作,虾肉含量低、鲜味不足和弹性较差。

鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*),因其形如鹰爪而出名^[5],又名鸡爪虾、厚壳虾。鹰爪虾海捕产量大、肉多味鲜,营养价值高,是我国东海和黄海重要的生态和经济虾种^[6-7]。本研究以鹰爪虾和南美白对虾为原料,探究不同漂洗水料比、漂洗时

间对虾滑凝胶性能的影响以及不同配方工艺(马铃薯淀粉添加量、食盐添加量、南美白对虾-鹰爪虾粒糜比)对虾滑感官品质的影响,并通过响应面法获取虾滑最优配方,为高品质虾滑类制品的开发提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鹰爪虾购于中国舟山国际水产城,体长(15.0 ± 0.09) cm、质量(16.2 ± 0.11) g,装入冰盒密闭保鲜,运至实验室后立刻-18 ℃冷冻贮藏;南美白对虾购于杭州物美大卖场;马铃薯淀粉、鸡蛋、食盐、姜粉、料酒、食用油:市售;TMS-pro 质构仪:美国 FTC 公司;其它基础仪器设备均为国产通用型。

1.2 虾滑的制备

参考徐晨等^[8]和董志俭等^[9]的方法,并稍加改进:鹰爪虾 4 ℃解冻后采肉并去除虾线,冰水中稍加清洗后沿着虾的腹节将虾肉切成大小相近块状,以不同的条件将虾肉漂洗并滤干,加入 0.5% 姜粉和 1% 的料酒去腥后,将虾肉块和不同比例的食盐放入料理机擂溃 2 min;南美白对虾采肉去虾线后冰水中稍加清洗,沿着虾的腹节切块并将每个腹节四等分切成虾肉碎;不同配比的白虾肉碎、马铃薯淀粉、5% 蛋清和 3% 食用油加入鹰爪虾糜中搅拌均匀,塑成大小合适的丸子形状,制备成虾滑样品。

1.3 漂洗工艺的确定

1.3.1 水料比对虾滑凝胶性能的影响 鹰爪虾肉

收稿日期:2021-02-27

基金项目:“蓝色粮仓”国家重点研发计划项目(2019YFD0902000)

作者简介:朱凯(1996—),男,硕士生

通信作者:戴志远 E-mail: dzy@zjgsu.edu.cn

粒分成5份,分别加入水料比为5:1、7:1、9:1、11:1、13:1的清水,不断搅拌7 min,其间保持漂洗液温度在0℃左右。漂洗后的虾肉用双层滤布拧干,加入2%的食盐擂溃2 min,进行质构测定。

1.3.2 漂洗时间对虾滑凝胶性能的影响 鹰爪虾肉粒分成5份,各加入水料比为11:1的清水,分别漂洗3、5、7、9、11 min,不断搅拌,其间保持漂洗液温度在0℃左右,其余同1.3.1节。

1.4 单因素实验

1.4.1 马铃薯淀粉添加量对虾滑感官品质的影响

鹰爪虾肉分成6份按照1.3节获得的最优漂洗工艺进行漂洗、滤干,用质量分数0.5%姜粉和1%的料酒去腥,加入2%的食盐擂溃成糜,分别加入0、2%、4%、6%、8%、10%的马铃薯淀粉和5%的鸡蛋清、3%食用油、24%的白虾粒,用手塑成丸子,40℃水浴30 min,90℃煮熟,进行感官评定。

1.4.2 虾粒比对虾滑感官品质的影响 鹰爪虾肉分成6份按照1.3节获得的最优漂洗工艺进行漂洗、滤干,用0.5%姜粉和1%的料酒去腥,加入2%的食盐擂溃成糜,分别按照粒糜比0、0.16:1、0.2:1、0.24:1、0.28:1、0.32:1加入白虾粒,以及6%的马铃薯淀粉和5%的鸡蛋清、3%食用油,其余同1.4.1节。

1.4.3 食盐添加量对虾滑感官品质的影响 鹰爪虾肉分成5份,照1.3节获得的最优漂洗工艺进行漂洗、滤干,用0.5%姜粉和1%的料酒去腥,分别加入0、1%、2%、3%、4%的食盐擂溃成糜,再加入24%白虾粒、6%淀粉和5%鸡蛋清其余同1.4.1节。

1.5 响应面优化试验

在单因素实验的基础上挑选对产品感官品质影响最显著的因素和水平,以A(淀粉添加量)、B(粒糜比)、C(食盐添加量)为自变量,感官得分为响应值Y,设计三因素三水平响应面试验,试验设计因素水平表见表1。

1.6 虾滑产品感官评价模型的构建

1.6.1 因素评价矩阵 感官评价因素集是影响鹰爪虾滑感评价得分的影响因素的集合,以口感 u_1 、滋味 u_2 和色泽 u_3 3项指标建立感官评价因素集 $U=\{u_1, u_2, u_3\}$;评价集是评价员对产品可能做出的各种结果的集合^[10-11]。以优 v_1 、良 v_2 和差 v_3 3项结

表1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface analysis

水平	因素		
	淀粉添加量 (A)/%	粒糜比 (B)	食盐添加量 (C)/%
-1	4	0.2:1	1
0	6	0.24:1	2
1	8	0.28:1	3

果建立感官评价集 $V=\{v_1, v_2, v_3\}$,以10分为标准,设定单指标得分8~10分为优 v_1 ,5~7分为良 v_2 ,1~4分为差 v_3 。根据感官评定结果,进行因素模糊评价,获得因素评价矩阵。

1.6.2 因素评价权重集 在感官评价过程之中,各评价因素的重要程度是不相同的,因此需要给每一个因素 u_i 赋予一个权重 a_i ,各评价因素的权重即组合成权重集 $A=(a_1, a_2, a_3)$ 。根据归一化法原则:

$$\sum a_i = 1$$

即 $a_1+a_2+a_3=1$ 。采取用户调查法^[12],由20名专业感官分析人员各自对影响虾滑品质的口感、滋味、色泽3项因素赋予权重,求得各因素权重的平均值的集合即为因素评价权重集^[13-14]。

1.6.3 感官评价标准 成立由20名身体健康、无任何感官方面缺陷的、经过专业培训的水产品感官评价员组成的评价小组(10男10女),采用双盲法对鹰爪虾滑样品口感、滋味和色泽进行感官评价。感官评价标准见表2。

1.7 质构的测定

质构测定参照Zhang等^[15]的方法,并稍作修改:样品压成长×宽×高为4 cm×4 cm×2.5 cm的长方体,两段法(40℃水浴30 min、90℃加热20 min)加热后于冰水冷却30 min,4℃冰箱冷藏12 h,随后拿出于室温平衡2 h,利用质构仪在TPA程序方法下进行测定。质构测试的参数为:探头类型P0.5,检测速度1.00 mm/s,起始力0.100 N,形变量60%。质构指标选取:凝胶强度和弹性;破裂强度与破裂位移的乘积为凝胶强度,即:

$$\text{凝胶强度 (g} \cdot \text{mm)} = \text{破裂强度 (g)} \times \text{破裂位移 (mm)}$$

表2 虾滑感官评价标准

Table 2 Criteria for sensory evaluation of shrimp ball

指标	感官描述	得分
口感	咀嚼弹性好,组织紧密有分布均匀的小气孔,虾肉粒黏合度好	8~10
	咀嚼弹性一般,组织较紧密但小气孔分布不均匀,虾肉粒黏合度一般	5~7
	虾滑无弹性,组织松散且存在大气孔,虾肉粒未能有效黏合;或虾滑太硬不易嚼碎,有明显的淀粉质感	1~4
滋味	咸淡适中,有浓郁的海虾风味,无腥味或异味	8~10
	咸淡适中,有较淡的海虾风味,无明显腥味或异味	5~7
	偏咸或偏淡,海虾风味不足,存在腥味或异味	1~4
色泽	鲜亮的粉红色,分布均匀,有光泽	8~10
	较淡的粉红色,分布较均匀,略有光泽	5~7
	颜色暗淡,分布不均,无光泽	1~4

1.8 数据处理与分析

采用 SPSS 21.0 软件进行数据处理, 差异显著性分析采用最小显著性差异法(LSD);采用 Design-Expert.V8.6 软件进行响应面分析;采用 Origin 2019 软件进行图表绘制。以上各组试验均进行 3 组平行试验,试验结果用“平均值±标准差”表示,并标注显著性差异。

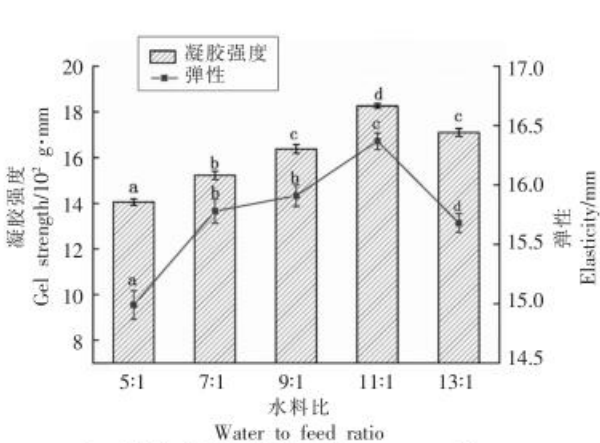
2 结果与分析

2.1 漂洗工艺对虾滑凝胶性能的影响

2.1.1 漂洗水料比对虾滑凝胶性能的影响 漂洗是生产高质量鱼糜的关键工序,目的是去除鱼糜中的肌浆蛋白、内源性蛋白酶、脂质和色素等成分,从而相应浓缩盐溶性蛋白^[16]。漂洗的水料比决

定着一定时间内水溶性物质溶出的限度。虾滑的凝胶强度和弹性随着水料比的增加先上升后下降,在水料比为 11:1 时分别达到最高值 1 826 g·mm 和 16.37 mm(见图 1),主要是因为适当的水料比可以降低水溶性的肌浆蛋白含量,使得 MPs 的含量提高,高含量的 MPs 有利于交联过程的发生;而过高的水料比同样会使得 MPs 含量下降,不利于 MPs 相互交联形成空间网状结构^[17]。

2.1.2 漂洗时间对虾滑凝胶性能的影响 漂洗时间决定着一定水料比下,虾肉中水溶性物质的溶出量。随着漂洗时间的增加,样品的凝胶强度和弹性都呈现先上升后下降的趋势,在 7 min 时分别达到最大值 1 869 g·mm 和 15.24 mm(见图 2)。适当的漂洗时间可以使得水溶性蛋白含量下降,而



注:不同的字母表示差异显著(P<0.05),下同。

图1 水料比对虾滑凝胶强度和弹性变化的影响

Fig.1 Effects of water to feed ratios on the gel strength and elasticity in *T. curvirostris* prawn ball

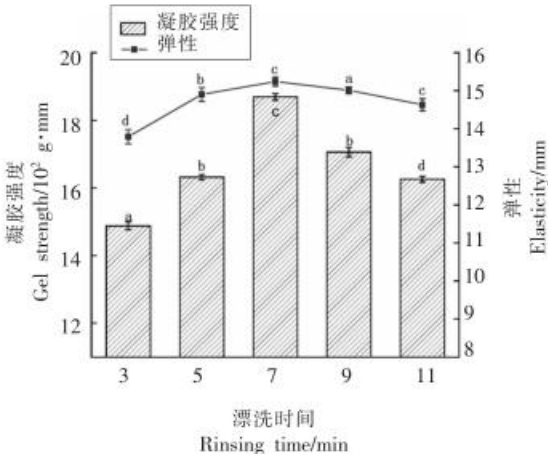


图2 漂洗时间对虾滑凝胶强度和弹性变化的影响

Fig.2 Effects of rinsing time on the gel strength and elasticity in *T. curvirostris* prawn ball

长时间的漂洗同样使得一部分 MPs 溶出,降低了 MPs 的浓度。因此,选择水料比 11:1,漂洗时间 7 min 作为鹰爪虾肉较优的漂洗参数。

2.2 模糊综合评价结果

2.2.1 因素评价权重的确定 为消除主观感受的模糊度,提高感官评定的可信度,对鹰爪虾滑感官品质进行模糊综合评价。由 20 位专业感官评定人员依次评定得到的各因素权重分布见表 3。

3 项评价因素的权重集 $A=(a_1,a_2,a_3)=(0.359,0.342,0.299)$,即 3 项因素对虾滑感官品质都十分重要,其中口感被认为是最重要的因素,滋味次之,而色泽相对前两者影响程度更小。

2.2.2 因素评价矩阵和最终得分 对每个样品因素集 U 中的各因素 u_i 进行评价,计算各因素在评价集 V 中各评价结果 v_i 的占比,可得到有序对 (u_i,v_j) 指定的隶属度,从而获得感官模糊综合评价矩阵 R 。以单因素实验中马铃薯淀粉添加量为 6% 时所得样品 R_1 为例,其 (u_i,v_j) 的隶属度见表 4。

由此得到模糊综合评价矩阵:

$$R_1=\begin{pmatrix} 0.90 & 0.10 & 0 \\ 0.90 & 0.10 & 0 \\ 0.90 & 0.10 & 0 \end{pmatrix}$$

通过模糊变化,求得评价集 V 上的模糊向量 $B=A \ast R$,即样品最终的综合评价结果:

$$B_1=A_1 \times R_1=(0.359,0.342,0.299)=\begin{pmatrix} 0.90 & 0.10 & 0 \\ 0.90 & 0.10 & 0 \\ 0.90 & 0.10 & 0 \end{pmatrix}=(0.90,0.10,0)$$

以上结果说明,上述样品 R_1 被 90% 的感官评价人员评定为优,被 10% 的评定为良,无评定人员认为样品感官等级为差。

样品最终得分 Y_1 为 B_1 与评价标准赋值 H_1

的乘积。设定 $H_1=\begin{pmatrix} v_1=9 \\ v_2=6 \\ v_3=2.5 \end{pmatrix}$,即得最终得分:

$$Y_1=B_1 \times H_1=\begin{pmatrix} 9 \\ 6 \\ 2.5 \end{pmatrix}=8.70$$

同理可得其它组样品感官评定得分。

2.3 单因素实验结果

2.3.1 马铃薯淀粉添加量对产品感官品质的影响 马铃薯淀粉的添加量能显著影响虾滑感官得分

表 3 评价鹰爪虾滑感官质量各因素的权重分布统计

Table 3 Weight distribution statistics of factors for evaluating sensory quality of *T. chinensis*

评价因素	口感	滋味	色泽
权重	0.359	0.342	0.299

表 4 样品 1 (u_i,v_j) 的隶属度

Table 4 Membership degree of (u_i,v_j) of sample 1

U	V		
	优 v_1	良 v_2	差 v_3
口感 u_1	0.90	0.10	0
滋味 u_2	0.90	0.10	0
色泽 u_3	0.90	0.10	0

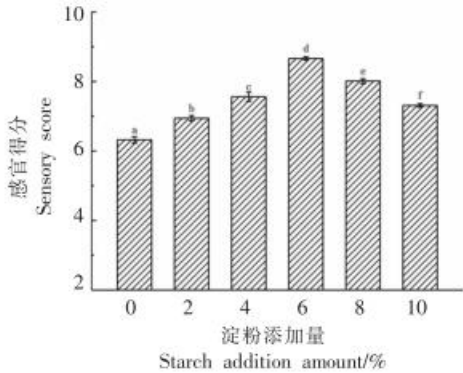


图 3 马铃薯淀粉添加量对虾滑感官得分的影响
Fig.3 Effects of potato starch addition amount on sensory score of shrimp balls

(图 3)。随着淀粉添加量的增大,在一定范围能虾滑感官得分呈上升趋势,在 6% 添加量时达到最大值,之后感官评分开始下降。马铃薯淀粉具有较多的支链结构,可以与蛋白质相互交联以增强凝胶结构;此外,淀粉吸水溶胀,一定温度加热糊化后体积增大,可以填充于凝胶的三位网状空间,有利于凝胶的稳定性^[17]。工业生产中常常通过添加适量的淀粉来达到增强产品品质和降低生产成本的目的^[18]然而过多的淀粉会阻碍蛋白质凝胶的形成,降低虾肉风味强度,破坏虾滑特有的口感和风味体验,因此在添加量大于 6% 时,虾滑感官得分开始下降。

2.3.2 虾粒糜比对产品感官品质的影响 向虾滑中添加鹰爪虾粒可以显著提升虾滑的感官得分(图 4)。产品感官得分呈上升趋势,直到粒糜比为

0.24:1 时达到最大值,此后得分开始下降。适当的粒糜比可以使虾滑兼具良好的弹性、咀嚼感和虾肉风味,提高产品整体感官品质;过多虾粒可能会影响蛋白质凝胶的形成,降低虾滑的质构特性,影响感官品质。

2.3.3 食盐添加量对产品感官品质的影响 不同的食盐添加量可以改变虾滑的感官得分(图5),

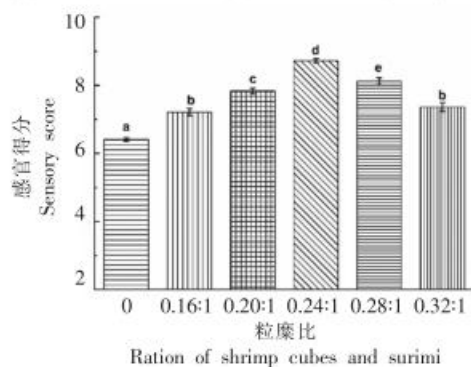


图4 虾粒糜比对虾滑感官得分的影响

Fig.4 Effects of ration of shrimp cubes and surimi on sensory score of shrimp balls

2.4 虾滑响应面试验结果分析

2.4.1 模型建立与方差分析 响应面试验遵循 Box Behnken 设计建立数学模型,具体设计与结果见表5。在第1号试验中虾滑获得最高感官得分,即在淀粉添加量、粒糜比和食盐添加量分别为6%、0.24:1和2%时,感官得分达到8.646分。以感官得分为响应值Y,由 Design-Expert.V8.6 软件对试验数据进行回归拟合,得到二次多项式回归模

在2%添加量时达到最高值。食盐具有调味的作用,这可以影响消费者的感官体验,过多的食盐会导致感官得分的下降;其中的NaCl使得虾肉中肌球蛋白溶出达到聚集的作用,利于蛋白质的相互交联;此外Na⁺具有提高内源性TGase活性的功能,进一步帮助虾滑凝胶形成^[17,19]。

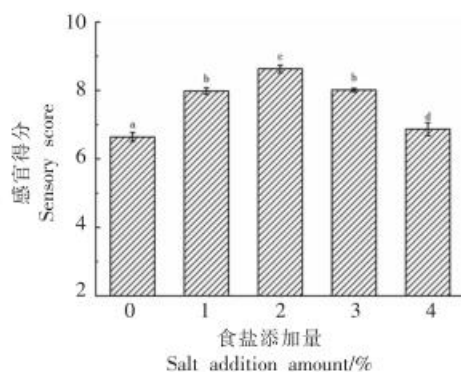


图5 食盐添加量对虾滑感官得分的影响

Fig.5 Effects of salt addition amount on sensory score of shrimp balls

型:

$$Y = 8.52 - 0.43A + 0.20B - 0.083C - 0.26AB - 0.071AC + 0.095BC - 1.12A^2 - 0.48B^2 - 0.39C^2$$

模型决定系数 $R^2=0.9819$,说明模型的拟合度高。二次多项式模型调整系数 R^2 和预测系数 R^2 均处于较高水平(分别为0.9587和0.8787),说明模型对试验观察值由较好的预测精确性。

对模型进行进行方差分析(见表6)可知,各

表5 响应面试验设计与结果

Table 5 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	因素			感官得分 (Y)	试验号	因素			感官得分 (Y)
	A	B	C			A	B	C	
1	0	0	0	8.646	10	1	0	1	6.271
2	0	1	-1	7.791	11	0	0	0	8.320
3	0	-1	-1	7.696	12	0	-1	1	7.316
4	-1	0	-1	7.411	13	0	0	0	8.324
5	-1	1	0	7.696	14	1	-1	0	6.461
6	1	0	-1	6.556	15	0	0	0	8.642
7	-1	-1	0	6.651	16	-1	0	1	7.411
8	0	1	1	7.791	17	0	0	0	8.643
9	1	1	0	6.461					

注:A. 淀粉添加量;B. 粒糜比;C. 食盐添加量。

因素对虾滑感官得分的影响顺序按降序依次为淀粉添加量(A)、粒糜比(B)和食盐添加量(C);一次项 A 和二次项 A^2 、 B^2 和 C^2 对响应值影响极显著 ($P<0.01$);而 B、AB 项对响应值影响显著 ($P<0.05$)。模型 $P<0.0001$,说明仅有 0.1%的概率使得试验值

之间的差异由试验设计不当引起的抽样误差所导致,进一步说明了模型拥有较好的预测精确性。模型显著以及失拟项不显著 ($P>0.05$),说明其符合试验观察值以及适用于观察值的预测。

表 6 二次多项式模型的方差分析

Table 6 Variance analysis of response surface quadratic model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	10.65	9	1.18	42.29	<0.0001	显著
A	1.46	1	1.46	52.24	0.0002**	
B	0.33	1	0.33	11.65	0.0112*	
C	0.055	1	0.055	1.97	0.2027	
AB	0.27	1	0.27	9.75	0.0168*	
AC	0.020	1	0.020	0.73	0.4225	
BC	0.036	1	0.036	1.29	0.2935	
A^2	6.24	1	6.24	223.06	<0.0001**	
B^2	0.98	1	0.98	34.87	0.0006**	
C^2	0.63	1	0.63	22.47	0.0021**	
残差	0.20	7	0.028			
失拟项	0.070	3	0.023	0.74	0.5810	不显著
误差项	0.13	4	0.031			
总变异	10.85	16				

注; $P<0.05$ 时用“*”表示影响显著; $P<0.01$ 时用“**”表示影响极显著。

2.4.2 交互作用分析 3D 响应面图更加直观的反映了独立变量之间相互作用对响应值的影响。图 6 显示当食盐添加量取零水平,粒糜比保持不变时,随着淀粉添加量的增加,鹰爪虾滑的感官得

分呈现先上升后下降的趋势;当淀粉添加量保持不变时,粒糜比对感官得分的影响曲线呈现抛物线形状,即随着粒糜比的增加,感官得分先增加后减少。图 7 显示当粒糜比取零水平,淀粉添加量和

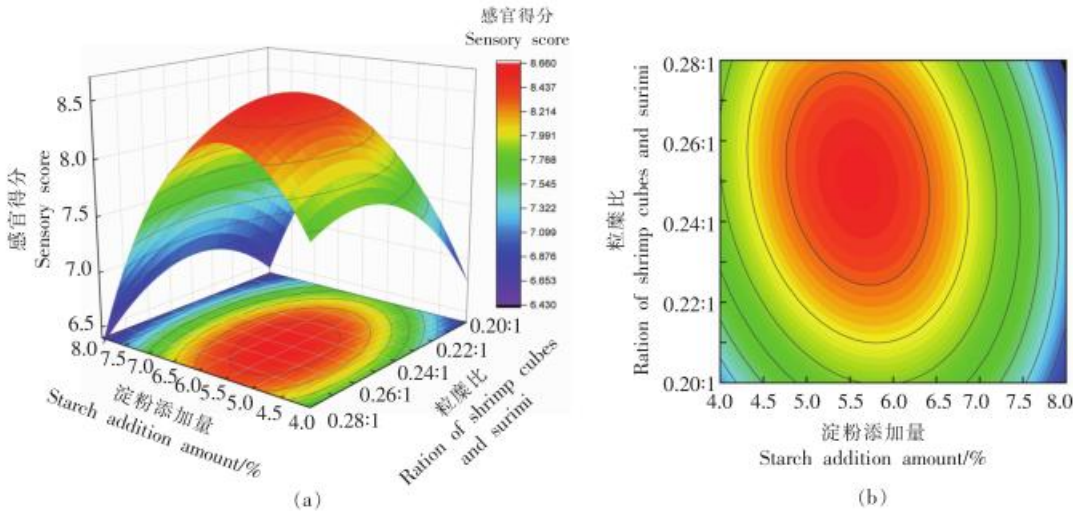


图 6 淀粉添加量与粒糜比的交互作用

Fig.6 Interaction between starch addition amount and ration of shrimp cubes and surimi

食盐添加量对虾滑感官品质的影响均呈现先上升后下降的抛物线状。图8显示当淀粉添加量取零水平时,食盐添加量和粒糜比对虾滑感官品质的影响均呈现先上升后下降的趋势。

等高线图可以反应两独立因素之间的交互作用,其中椭圆的离心率越接近1,则椭圆越扁,交互作用就越强;反之则椭圆越圆,交互作用越弱^[20-21]。淀粉添加量和粒糜比交互作用时的等高

线图接近椭圆形,说明交互作用明显;而淀粉添加量与食盐添加量交互作用、粒糜比和食盐添加量交互作用的等高线图接近圆形,交互作用对响应值的影响不显著。由ANOVA表,可知AB、AC、BC项的 P 值分别为 $0.0168 < 0.05$ 、 $0.4225 > 0.05$ 和 $0.2935 > 0.05$,等高线图与 P 值代表的交互作用对响应值影响程度相一致。

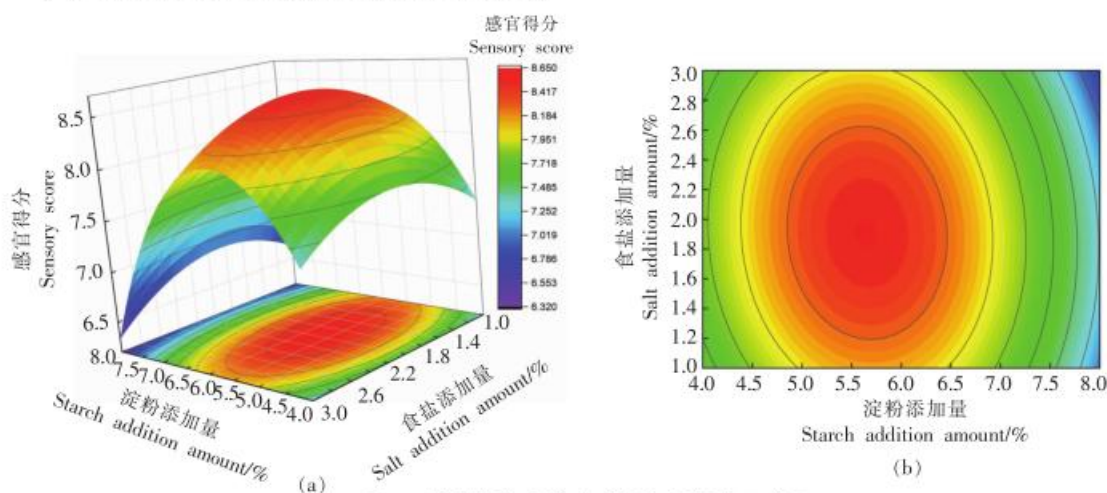


图7 淀粉添加量与食盐添加量的交互作用

Fig.7 Interaction between starch addition amount and salt addition amount

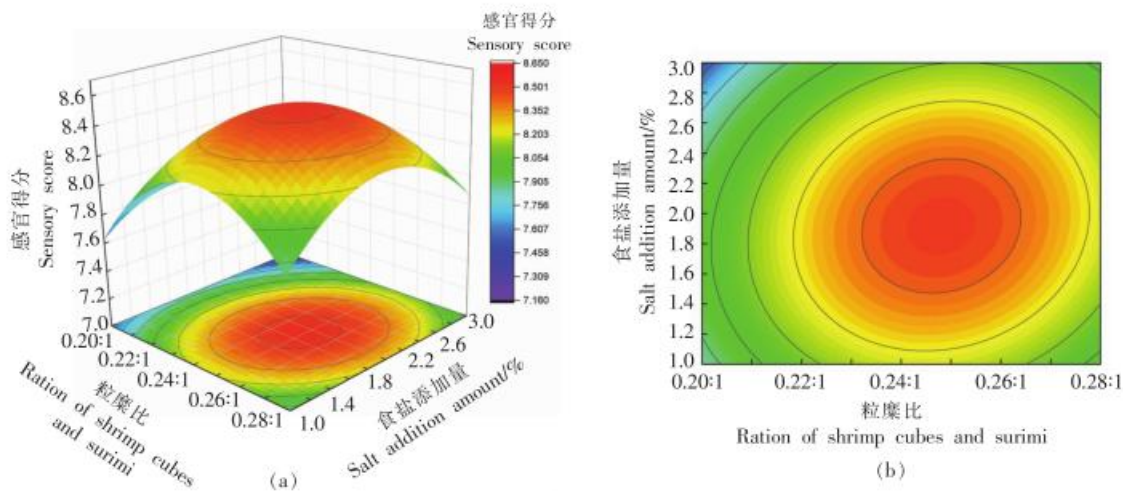


图8 粒糜比与食盐添加量的交互作用

Fig.8 Interaction between ratio of shrimp cubes and surimi and salt addition amount

2.4.3 回归模型最优解的确定与验证 通过响应面模型优化鹰爪虾滑配方工艺,预测得最优参数为:淀粉添加量 5.60%、粒糜比 0.2503:1、食盐添加量 1.94%,此时虾滑感官得分为 8.588。考虑实际可操作性,将模型最优解修正为:淀粉添加量

5.60%、粒糜比 0.25:1、食盐添加量 1.9%,对最优解进行验证,得到鹰爪虾滑感官得分得实际值为 8.601 ± 0.103 。理论值与预测值之间差异不显著 ($P > 0.05$),证明回归模型可信度较好。

3 结论

虾滑是一种滋味鲜美和口感独特的营养健康食品,深受消费者喜爱。本研究通过单因素实验和响应面优化得到了南美白对虾-鹰爪虾滑的最佳工艺参数:鹰爪虾肉加入11倍体积冰水漂洗7 min,滤干后加入0.5%姜粉、1%料酒和1.9%食盐捣溃成糜,之后加入5.6%马铃薯淀粉、25%白虾粒、5%鸡蛋清和3%食用油搅拌均匀。本设计解决了市面上虾滑弹性不佳和虾肉含量不足等问题,为虾肉加工提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] TOU J C, JACZYNSKI J, CHEN Y C. Krill for human consumption: Nutritional value and potential health benefits[J]. *Nutrition Reviews*, 2007, 65(2): 63-77.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 15-46.
Fisheries and Fisheries Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 15-46.
- [3] 黄梅婷. 南美白对虾加工研究进展[J]. *福建轻纺*, 2018(10): 29-33.
HUANG M T. Review on *Penaeus vannamei* processing[J]. *The Light & Textile Industries of Fujian*, 2018(10): 29-33.
- [4] 曹文红, 赵子科, 田申, 等. 脊尾白虾虾糜的制备及其抗冷冻变性工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(2): 46-52.
CAO W H, ZHAO Z K, TIAN S, et al. Technology of shrimp surimi preparation from *Exopalaemon carinicauda* and its anti-freeze denaturation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(2): 46-52.
- [5] 孙林. 鹰爪虾储存过程中品质变化的研究[J]. *现代食品*, 2018(17): 97-100.
SUN L. Study on quality change of white-hair rough shrimp during storage[J]. *Modern Food*, 2018(17): 97-100.
- [6] HAN Z Q, ZHU W B, ZHENG W, et al. Significant genetic differentiation between the Yellow Sea and East China Sea populations of cocktail shrimp *Trachypenaeus curvirostris* revealed by the mitochondrial DNA COI gene[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 59: 78-84.
- [7] 宋海棠, 俞存根, 姚光展. 东海鹰爪虾的数量分布和变动[J]. *海洋渔业*, 2004, 26(3): 184-188.
SUN H T, YU C G, YAO G Z. Study on biomass distribution and variation of *Trachypenaeus curvirostris* in the East China Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2004, 26(3): 184-188.
- [8] 徐晨, 诸永志, 葛庆丰, 等. 不同外源蛋白对小龙虾丸品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(4): 20-26.
XU C, ZHU Y Z, GE Q F, et al. Effect of exogenous proteins on the quality of crayfish balls [J]. *Meat Research*, 2020, 34(4): 20-26.
- [9] 董志俭, 孙丽平, 祁兴普, 等. 海鲈鱼/草鱼鱼丸的加工工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(2): 103-107.
DONG Z J, SUN L P, QI X P, et al. Study on processing technology of sea bass/grass carp fish ball [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(2): 103-107.
- [10] YU P, LOW M Y, ZHOU W. Design of experiments and regression modelling in food flavour and sensory analysis: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 202-215.
- [11] 代文婷, 王远, 邢丽杰, 等. 蟠桃-葡萄-黑枸杞复合饮料的配方优化[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(1): 172-179.
DAI W T, WANG Y, XING L J, et al. Optimization of formula of flat peach grape and black wolfberry compound beverage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(1): 172-179.
- [12] 傅丽, 张妍, 龚辉, 等. 基于模糊数学综合评价法优化水晶虾仁的浆液配方[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(11): 209-213, 218.
FU L, ZHANG Y, GONG H, et al. Formular optimization of starch in crystal shrimps based on the fuzzy mathematics evaluation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(11): 209-213, 218.
- [13] 李洁, 武轩. 传统凤型大曲后熟期成熟度评价及最佳贮藏期研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(24): 97-102.
LI J, WU X. Maturity evaluation and optimum stor-

- age time of traditional Feng-type Daqu in post-maturity period[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(24): 97-102.
- [14] 袁钰, 李静, 罗红霞, 等. 模糊数学评价与响应面结合优化老北京豆汁儿的发酵工艺[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 349-355.
- YUAN Y, LI J, LUO H X, et al. Fuzzy mathematics evaluation combined with response surface to optimize the fermentation process of Beijing Douzhi[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(3): 349-355.
- [15] ZHANG L T, LI Q, SHI J, ZHU B W, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during setting and heating: Effects of different washing solutions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 116-124.
- [16] 薛茜, 王芳, 张龙涛. 水产制品凝胶的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 253-257.
- XUE X, WANG F, ZHANG L T. Review on gel in aquatic product[J]. The Food Industry, 2020, 41(2): 253-257.
- [17] JIA R, KATANO T, YOSHIMOTO Y, et al. Sweet potato starch with low pasting temperature to improve the gelling quality of surimi gels after freezing[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 467-473.
- [18] SUN X D, HOLLEY R A. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1): 33-51.
- [19] NÚÑEZ-FLORES R, CANDO D, BORDERÍAS A J, et al. Importance of salt and temperature in myosin polymerization during surimi gelation[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1226-1234.
- [20] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert, SPSS 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 35-56.
- XU X H, HE M Z. Experimental design and application of Design-Expert and SPSS[M]. Beijing: Science Press, 2010: 35-56.
- [21] 王娜, 李鸿梅, 吴洪峰, 等. 响应面法优化荷叶池沼公鱼鱼糕工艺配方[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(4): 150-155, 161.
- WANG N, LI H M, WU H F, et al. Optimization of process formula of lotus leaf-pond smelt kamaboko gel by response surface method[J]. Storage and Process, 2019, 19(4): 150-155, 161.

Fuzzy Comprehensive Evaluation Combined with Response Surface Methodology for Optimization of the Processing Technology of White-hair Rough Shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*) Prawn Ball

Zhu Kai¹, Zheng Feiyang¹, Guo Liping¹, Zhang Yiqi^{1,2}, Lu Yanbin^{1,2}, Dai Zhiyuan^{1,2*}

¹Institute of Seafood, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012

²Key Laboratory of Aquatic Products Processing of Zhejiang Province, Hangzhou 310012

Abstract The effects of different rinsing techniques on the gel property of prawn ball were studied with white-hair rough shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) as raw materials, and the formula was optimized. The best rinsing process for shrimp meat was water ratio 11:1 and rinsing time 7 min, taking gelation strength, elasticity and adhesive strength as indicators. The fuzzy comprehensive evaluation and response surface methodology (RSM) results showed that the optimal solution was as follow: 5.6% potato starch, 25% white shrimp and 1.9% salt, taking sensory score as indicator. This study can provide data support for the improvement of processing technology of white-hair rough shrimp products and prawn ball products.

Keywords white-hair rough shrimp; fuzzy comprehensive evaluation; response surface methodology (RSM); processing technology