

黑鱼片复配水分保持剂配方优化

陈东清^{1,2,3}

(1. 安井食品集团股份有限公司,福建 厦门 361022;2. 福建省冷冻调理水产品加工重点实验室,福建 厦门 361022;3. 厦门市速冻调制食品重点实验室,福建 厦门 361022)

摘要: 为得到一种复配水分保持剂以降低磷酸盐用量并提高持水性,以黑鱼为对象,通过单因素试验探究不同浓度的三聚磷酸钠、焦磷酸钠、碳酸钠和柠檬酸对鱼片的增重率、解冻及熟化损失率和感官的影响。在此基础上,采用响应面法对各因素进行优化。结果表明,三聚磷酸钠浓度、焦磷酸钠浓度、碳酸钠浓度和柠檬酸浓度均对黑鱼片的品质影响显著。最佳条件为三聚磷酸钠浓度 1.3%、焦磷酸钠浓度 1%、碳酸钠浓度 0.7%、柠檬酸浓度 0.5%。在此条件下,增重率、解冻损失率、熟化损失率及感官评分分别为 56.01%、3.93%、11.37% 和 7.6,具有磷酸盐较低、增重率较高、解冻和熟化损失率较低的优点。研究表明,该复配水分保持剂可提高黑鱼片持水性、降低磷酸盐用量。

关键词: 黑鱼;保水剂;复配水分保持剂;持水性;配方优化

Formula Optimization of Composite Water Retention Agents for Snakehead Fish Fillets

CHEN Dongqing^{1,2,3}

(1. ANJOY Foods Group Co., Ltd., Xiamen 361022, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Refrigeration and Conditioning Aquatic Products Processing, Xiamen 361022, Fujian, China; 3. Xiamen Key Laboratory of Quick-frozen Prepared Food, Xiamen 361022, Fujian, China)

Abstract: To obtain a composite water retention agent to reduce the consumption of phosphates and improve the water holding capacity, snakehead fish was studied. The effects of different concentrations of sodium tripolyphosphate, sodium pyrophosphate, sodium carbonate, and citric acid on the weight gain rate, thawing loss rate, ripening loss rate, and sensory score of snakehead fish fillets were studied by single factor experiments. On this basis, various factors were optimized by the response surface method. The results indicated that sodium tripolyphosphate, sodium pyrophosphate, sodium carbonate, and citric acid had significant effects on the quality of snakehead fish fillets. The optimal conditions were as follows: sodium tripolyphosphate of 1.3%, sodium pyrophosphate of 1%, sodium carbonate of 0.7%, and citric acid of 0.5%. Under these conditions, the weight gain rate, thawing loss rate, ripening loss, and sensory score were 56.01%, 3.93%, 11.37%, and 7.6, respectively, with the advantages such as lower phosphate content, higher weight gain rate, and lower thawing and ripening loss rates. The research showed that the composite water retention agent could improve the water holding capacity of snakehead fish fillets and reduce the concentration of phosphates.

Key words: snakehead fish; water retention agent; composite water retention agent; water holding capacity; formula optimization

引文格式:

陈东清. 黑鱼片复配水分保持剂配方优化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 154-163.

CHEN Dongqing. Formula Optimization of Composite Water Retention Agents for Snakehead Fish Fillets[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 154-163.

黑鱼又称乌鳢,为肉食性鱼类,营养丰富、肉质细嫩、味道鲜美^[1],且较大多数鱼类肌间刺较少,广泛分

布在亚洲和非洲等淡水水域,是重要的淡水鱼之一^[2],也是我国重要的出口水产品之一。当前,随人民消费

基金项目:福建省冷冻调理水产品加工重点实验室开放课题(FPKLRCAPP2023-01)

作者简介:陈东清(1989—),女(汉),工程师,硕士,研究方向:水产品的加工、保鲜技术。

习惯的改变,预制菜的销量逐年攀升,部分水产品企业开始研制鱼片预制菜。其中,以鳕鱼、巴沙鱼和黑鱼等水产品为原料的各种预制菜深受消费者的喜爱^[3-4]。鱼类预制菜在销售运输环节会经历冻藏,从而发生冰晶损伤及蛋白质冷冻变性^[5],进而造成鱼肉的持水力下降^[6-8],在解冻和蒸煮后出现失水^[9]、外观色泽变暗和肉易碎掉渣等问题,影响产品的最终感官品质及营养价值^[10]。

持水力常被称为保水性,是指肉制品在加工过程中由于发生蛋白质静电作用和凝胶状结构形成的保持自身固有及所添加水分的能力^[11-12],也是肉制品加工过程中关键的控制指标之一,严重影响产品的品质。适当的保水性可提高肉制品的嫩度、口感、肉质等指标^[13-14]。通过提高肉制品的保水性,可增加产品出成率,降低生产成本,同时改善肉质口感。因此,提高鱼片的保水性、减少解冻和蒸煮过程造成的损失成为重点研究方向。目前,广泛使用的水分保持剂大多为磷酸盐类^[15-16],但添加过量会使产品产生明显碱味和金属涩味,机体长期摄入也会导致钙磷失衡^[17],影响健康状况。因此,磷酸盐含量较少甚至无磷的复配水分保持剂成为新的研究方向。

综上,研究一种可有效降低磷酸盐用量的复配水分保持剂对鱼片预制菜行业发展具有重要的意义,不仅可以提高鱼片的鲜度和口感,还可以避免因磷酸盐摄入过多带来的健康隐患。本文以生鲜黑鱼为原料,经宰杀处理得到鱼柳并切片,采用先浸泡后腌制的工艺探究不同复配水分保持剂配方对黑鱼片感官品质、增重率和解冻及熟化损失率的影响,以期得到新型的可用于黑鱼片预制菜的复配水分保持剂配方。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

黑鱼:市售;柠檬酸:河南万邦实业有限公司;三聚磷酸钠、焦磷酸钠、碳酸钠(均为食品级):湖北兴发化工集团股份有限公司;精制食用盐:中国盐业集团有限公司。

电磁炉(SR3041型):广东尚朋堂电器有限公司;电子天平(YH-M50001型):永康市五鑫衡器有限公司;pH计(pHS-3C型):上海佑科仪器仪表有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理

黑鱼去鳞、内脏、头尾→鱼柳→冷冻→解冻→切片→浸泡清洗→水分保持剂浸泡 1.5 h→加入 1% 精制食用盐置于 10℃ 以下腌制 20 h→沥水检测增重率→冻藏 3 d 以上→检测其他指标。

1.2.2 单因素试验

为测定三聚磷酸钠、焦磷酸钠、碳酸钠及柠檬酸 4 种水分保持剂浓度对黑鱼片持水性的影响,设计单

因素试验,将等量鱼片分别置于配好的水分保持剂溶液中浸泡、腌制、冻藏后进行测定。不同水分保持剂添加量设计为三聚磷酸钠及焦磷酸钠浓度 0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%,碳酸钠浓度 0%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%,柠檬酸浓度 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%。

1.2.3 响应面优化试验

为得到最佳的水分保持剂配比,在促进黑鱼片的口感的基础上得到较高增重率及较低水分损失,以单因素试验为基础^[18-20],按照响应面法设计四因素三水平试验,响应面因素及水平如表 1 所示。

表 1 响应面因素及水平

Table 1 Response surface factors and levels

水平	因素			
	A 三聚磷酸钠 浓度/%	B 焦磷酸钠 浓度/%	C 碳酸钠 浓度/%	D 柠檬酸 浓度/%
-1	1.2	0.6	0.3	0.3
0	1.4	0.8	0.5	0.4
1	1.6	1.0	0.7	0.5

1.2.4 指标测定

参照于淑池等^[21]和张雪莹等^[22]的方法,将腌制后的鱼片沥干至没有液滴,称其质量并记录,每个样品做 3 个平行试验,浸泡增重率($Z, \%$)按式(1)计算。

$$Z = \frac{M_1 - M}{M} \times 100 \quad (1)$$

式中: M_1 为黑鱼片浸泡腌制后的质量,g; M 为黑鱼片清洗后的质量,g。

将冻藏一定时间后的鱼片连同包装袋一起在室温下自然解冻 2 h,沥干至没有液滴,称其质量并记录,每个样品做 3 个平行试验,解冻损失率($J, \%$)按式(2)计算。

$$J = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

式中: M_1 为黑鱼片解冻前的质量,g; M_2 为黑鱼片解冻沥干后的质量,g。

将解冻后的鱼片置于沸水中,煮制 30 s,取出冷却至室温,沥干至没有液滴,称其质量并记录,每个样品做 3 个平行试验,熟化损失率($S, \%$)按式(3)计算。

$$S = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100 \quad (3)$$

式中: M_2 为黑鱼片解冻沥干后的质量,g; M_3 为黑鱼片蒸煮沥干后的质量,g。

1.2.5 感官评定

参照张海燕等^[23]、张平等^[24]关于鱼类的感官评价标准,对黑鱼片的状态及熟化后的色泽、滋味和口感等指标设计评价标准,选择 10 名有感官评定经验的人员进行感官评定。具体评分标准见表 2。

表2 感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard

项目	评分标准	分值
生鱼片状态 (2分)	鱼片自然白色,不透明	>1.5~2
	鱼片呈白色,无明显透明	>1~1.5
	鱼片呈现轻微透明	>0.5~1
	鱼片呈现严重透明	0~0.5
色泽 (2.5分)	白色略带粉色、光滑有光泽	>2~2.5
	白色略带黄色、稍有光泽	>1.5~2
	色泽稍黯淡,轻微黄色	>1~1.5
	色泽暗淡,颜色偏黄严重	0~1
滋味 (2.5分)	鲜味明显、回味持久、清爽无碱味	>2~2.5
	鲜味较淡、回味较持久、清爽无明显碱味	>1.5~2
	无明显鲜味、回味淡、轻微碱味	>1~1.5
口感 (3分)	鱼肉无鲜味且碱味明显发涩	0~1
	肉质嫩滑紧致、口感细腻、有弹性	>2.4~3.0
	口感较细腻、偏嫩、稍有弹性	>1.6~2.4
	口感偏硬或偏嫩、稍有弹性	>0.8~1.6
	口感柴硬或软烂、无弹性	0~0.8

1.3 数据处理

单因素试验采用 Origin 8.5 做图分析,响应面采用 Design-Expert 8.0.6 做图分析。

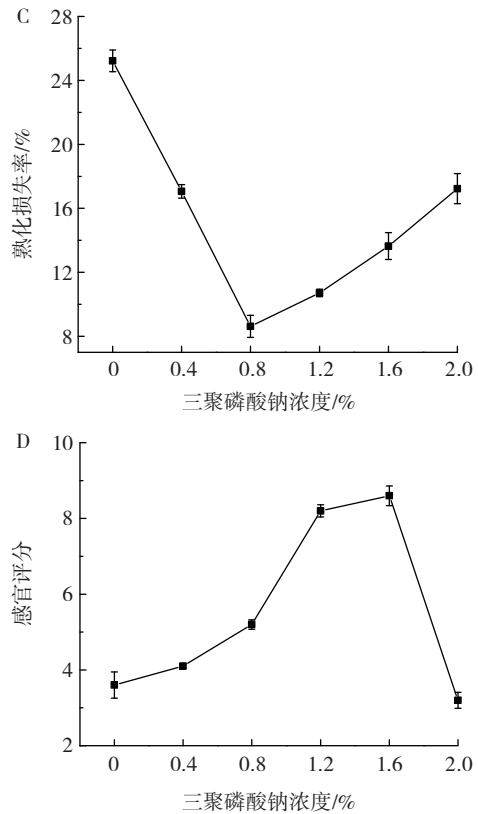
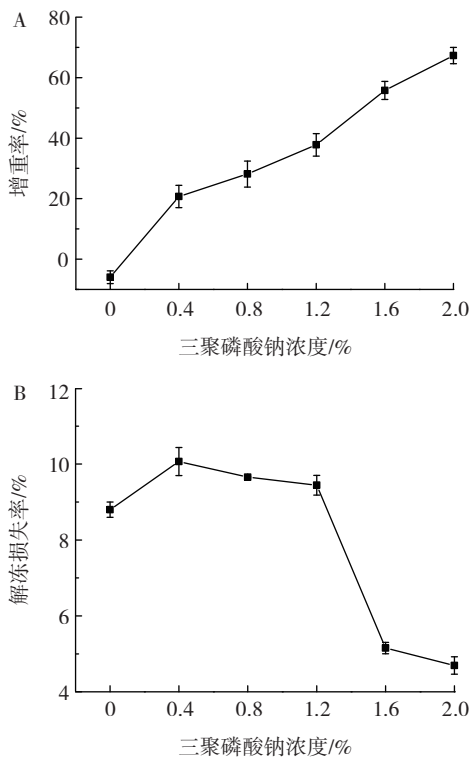
2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 三聚磷酸钠浓度对鱼片品质的影响

三聚磷酸钠浓度对鱼片品质的影响如图1所示。

由图1可知,随着三聚磷酸钠浓度增加,处理后样品的增重率逐渐增大、解冻损失率逐渐减少、熟化损失



A. 增重率; B. 解冻损失率; C. 熟化损失率; D. 感官评分。

图1 三聚磷酸钠浓度对鱼片品质的影响

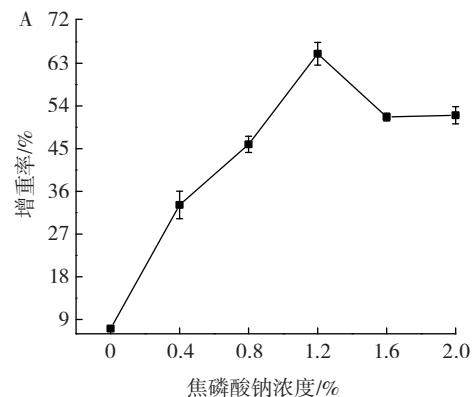
Fig.1 Effect of sodium tripolyphosphate concentration on fish fillet quality

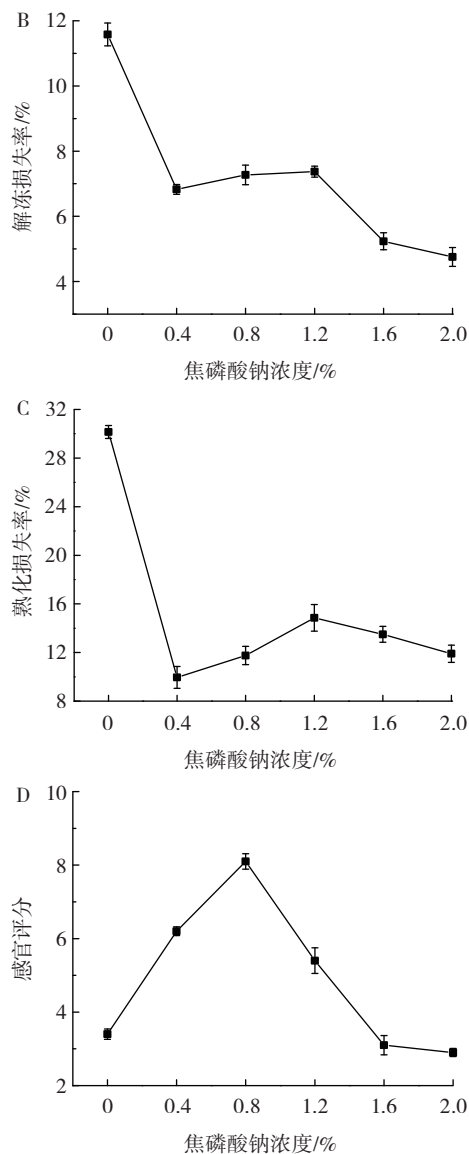
率先减小后增大、感官评分先增大后减小且在1.6%达到最高。其中增重率可以直接反映样品处理后吸收水分的多少,数值越高表明吸收的水分越多;解冻损失率可以衡量肌肉持水性,损失越小则肌肉持水性越好,感官评分代表了鱼片处理后人体感官对其的接受程度,分值越高可接受程度越高。三聚磷酸钠浓度越大,鱼片肌肉持水性越好,接受程度先升高后降低。因此,选择三聚磷酸钠浓度为1.2%、1.4%、1.6%进行后续响应面试验。

2.1.2 焦磷酸钠浓度对鱼片品质的影响

焦磷酸钠浓度对鱼片品质的影响如图2所示。

由图2可知,随着焦磷酸钠浓度增加,处理后样品





A. 增重率; B. 解冻损失率; C. 熟化损失率; D. 感官评分。

图2 焦磷酸钠浓度对鱼片品质的影响

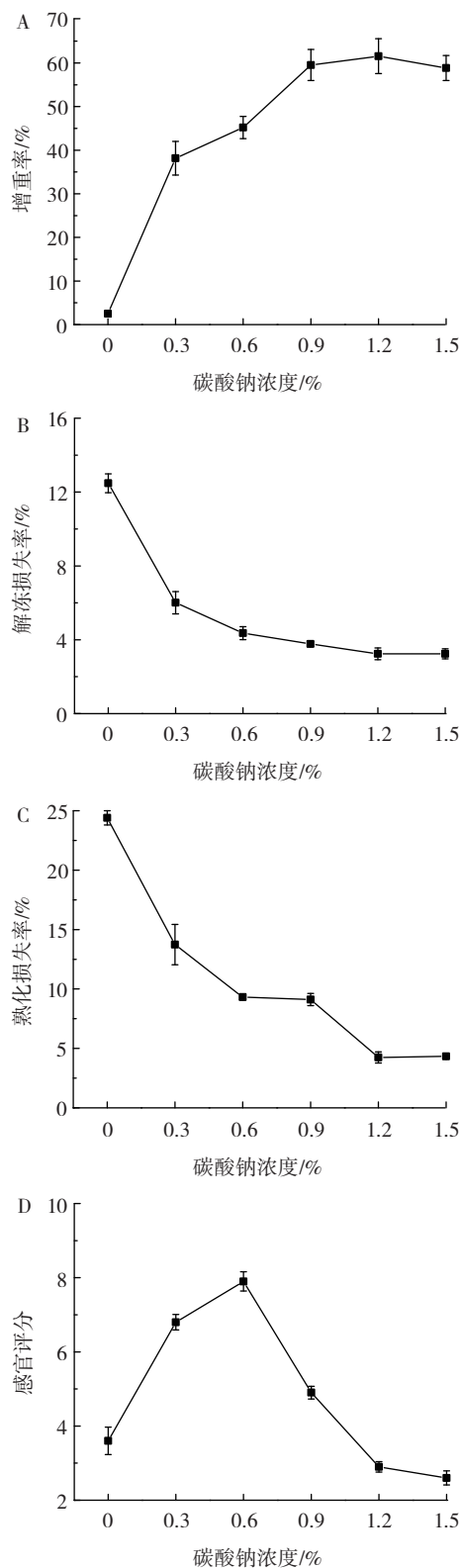
Fig.2 Effect of sodium pyrophosphate concentration on fish fillet quality

的增重率及感官评分均呈现先增大后减小的趋势,加入焦磷酸钠后,鱼片的解冻损失率和熟化损失率明显降低,且随焦磷酸钠浓度由0.4%增加至2.0%,此两项指标均呈先增大后减小的趋势,其中,当焦磷酸钠浓度为0.8%时感官评分达到最高,解冻损失率和熟化损失率相对较低,增重率相对较高;1.2%时增重率最高,解冻损失率和熟化损失率也较高,同时口感较差,碱味明显。适宜条件应选择较高的感官评分和增重率及较低的解冻及熟化损失率。因此,选择焦磷酸钠浓度为0.6%、0.8%、1.0%进行后续响应面试验。

2.1.3 碳酸钠浓度对鱼片品质的影响

碳酸钠浓度对鱼片品质的影响如图3所示。

由图3可知,随着碳酸钠浓度增加,处理后样品的



A. 增重率; B. 解冻损失率; C. 熟化损失率; D. 感官评分。

图3 碳酸钠浓度对鱼片品质的影响

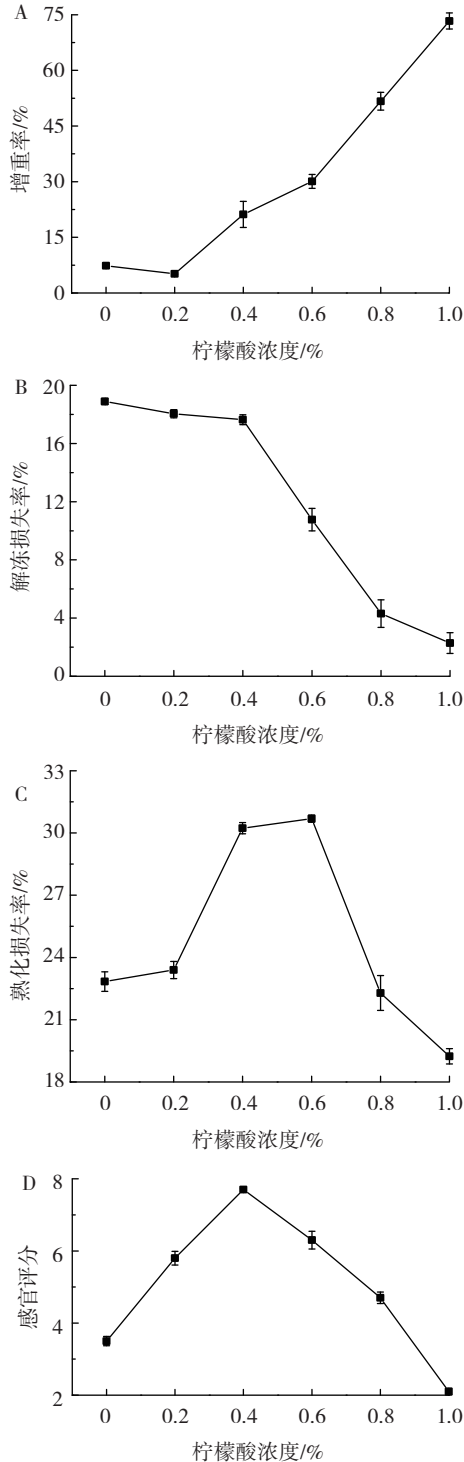
Fig.3 Effect of sodium carbonate concentration on fish fillet quality

增重率及感官评分先增大后减小,解冻损失率和熟化损失率均逐渐减小。其中,碳酸钠浓度为1.2%时增重

率最高,碳酸钠浓度为0.6%时感官评分达到最高,此后随着浓度增加,鱼片颜色逐渐发黄呈透明状、鱼皮变硬。因此,碳酸钠应控制在0.6%左右,故选择碳酸钠浓度为0.3%、0.5%和0.7%进行后续响应面试验。

2.1.4 柠檬酸浓度对鱼片品质的影响

柠檬酸浓度对鱼片品质的影响如图4所示。



A. 增重率; B. 解冻损失率; C. 熟化损失率; D. 感官评分。

图4 柠檬酸浓度对鱼片品质的影响

Fig.4 Effect of citric acid concentration on fish fillet quality

由图4可知,随着柠檬酸浓度增加,处理后的样品增重率逐渐增大、解冻损失率逐渐减小、熟化损失率及感官评分先增大后减小。原因可能是柠檬酸可以调节蛋白质的pH值,使其偏离等电点利于水分吸收,还可以络合金属离子,从而呈现增重率逐渐增大的情况;水分子与蛋白质结合程度不同,冷冻过程中结合不紧密的水分子形成较大冰晶,解冻时易析出造成损失。此外,熟化过程中结合不强的键发生断裂,造成再次损失。

当柠檬酸浓度为0.4%时感官评分最高,此后,鱼片酸味趋于明显且口感软烂且易出现碎渣。因此,柠檬酸浓度应控制在0.4%左右;结合增重率、解冻及熟化损失率,选择柠檬酸浓度为0.3%、0.4%和0.5%进行后续响应面试验。

2.2 响应面试验结果与讨论

2.2.1 响应面试验设计及结果

以单因素试验结果为基础,根据响应面试验原理设计试验^[25],以三聚磷酸钠浓度(A)、焦磷酸钠浓度(B)、碳酸钠浓度(C)和柠檬酸浓度(D)为自变量,以增重率、解冻损失率、熟化损失率和感官评分为评价指标进行试验,具体方案及结果见表3。

表3 响应面试验方案及结果

Table 3 Design and results of response surface test

试验号	A	B	C	D	增重率/%	解冻损失率/%	熟化损失率/%	感官评分
1	0	0	-1	-1	55.37	4.61	12.08	7.4
2	0	0	0	0	59.62	4.78	14.38	7.6
3	-1	-1	0	0	50.38	4.02	11.54	6.4
4	-1	1	0	0	53.42	4.05	11.96	6.9
5	0	0	0	0	58.50	4.82	14.52	7.9
6	1	-1	0	0	54.33	3.69	12.96	7.2
7	0	0	-1	1	49.50	4.40	14.64	7.1
8	0	0	1	-1	49.74	3.53	11.30	7.0
9	0	0	1	1	53.68	3.42	12.05	7.7
10	1	1	0	0	51.10	3.11	13.49	7.2
11	0	0	0	0	55.06	4.64	14.80	7.7
12	0	-1	1	0	48.94	3.16	10.82	6.4
13	0	1	-1	0	47.44	3.72	13.60	6.8
14	0	1	1	0	48.31	3.33	10.86	8.4
15	1	0	0	-1	53.96	3.58	11.16	6.5
16	0	0	0	0	55.49	5.08	14.29	7.7
17	1	0	0	1	44.54	3.58	13.46	6.6
18	-1	0	0	1	52.86	3.78	11.61	6.3
19	-1	0	0	-1	42.71	3.88	11.52	6.1
20	0	-1	-1	0	43.01	4.14	11.96	7.3
21	-1	0	1	0	54.14	4.63	11.13	6
22	0	1	0	-1	53.22	3.57	12.50	7.6
23	0	1	0	1	52.97	3.08	12.71	7.6
24	1	0	1	0	53.51	3.90	12.61	6.7
25	0	-1	0	1	56.31	3.55	14.24	6.8
26	1	0	-1	0	53.12	4.44	13.19	6.2
27	0	-1	0	-1	52.37	3.07	11.21	6.5
28	0	0	0	0	58.84	5.07	14.26	7.8
29	-1	0	-1	0	50.41	4.62	12.98	6.1
30	0	0	0	0	61.30	5.05	14.56	7.7

2.2.2 响应面模型建立及方差分析

通过 Design-Expert 8.0.6 分别对试验结果进行拟合,得到以增重率(Y_1)、解冻损失率(Y_2)、熟化损失率(Y_3)和感官评分(Y_4)为响应值的多元二次回归方程,具体如下。

$$Y_1 = -443.95 + 374.34A + 238.02B + 115.1C + 562.7D - 39.19AB - 20.87AC - 244.62AD - 31.62BC - 52.37BD + 122.62CD - 82.83A^2 - 91.21B^2 - 105.68C^2 - 296.96D^2$$

$$Y_2 = -44.71 + 26.19A + 45.14B + 6C + 65.6D - 3.81AB - 3.44AC + 1.25AD + 3.69BC - 12.12BD + 1.25CD - 8.23A^2 - 23.2B^2 - 6.29C^2 - 73.29D^2$$

$$Y_3 = -82.83 + 63.9A + 61.88B + 30.59C + 87.49D + 0.69AB + 7.94AC + 27.63AD - 10BC - 35.25BD - 22.62CD - 27.47A^2 - 26.72B^2 - 28.69C^2 - 99D^2$$

$$Y_4 = -45.7 + 69.29A + 3.52B - 13.56C + 26D - 3.12AB + 3.75AC - 1.25AD + 15.62BC - 3.75BD + 12.5CD - 23.96A^2 - 2.4B^2 - 8.66C^2 - 33.34D^2$$

为检验上述多元二次回归方程的有效性,分别对回归模型进行方差分析和显著性检验,具体如表 4~表 7 所示。

表 4 增重率的方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results of weight gain rate

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
回归模型	402.42	14	28.74	16.7	<0.000 1	***
A	3.67	1	3.67	2.13	0.167 8	
B	0.1	1	0.1	0.061	0.809 2	
C	7.47	1	7.47	4.34	0.057 5	
D	12	1	0.52	0.3	0.593 1	
AB	9.83	1	9.83	5.71	0.032 7	
AC	2.79	1	2.79	1.62	0.225 4	
AD	95.75	1	95.75	55.62	<0.000 1	***
BC	6.4	1	6.4	3.72	0.075 9	
BD	4.39	1	4.39	2.55	0.134 3	
CD	24.06	1	24.06	13.98	0.002 5	**
A ²	75.28	1	75.28	43.73	<0.000 1	***
B ²	91.27	1	91.27	53.02	<0.000 1	***
C ²	122.53	1	122.53	71.18	<0.000 1	***
D ²	60.47	1	60.47	35.13	<0.000 1	***
残差	22.38	13	1.72			
失拟项	18.63	10	1.86	1.49	0.410 4	
误差项	3.75	3	1.25			
总误差	587.79	29				

注:***表示影响高度显著($P < 0.001$);**表示影响极显著($P < 0.01$)。

由表 4 可知,模型 $P < 0.000 1$,失拟项 $P = 0.410 4$ 。决定系数(R^2)为 0.947 3,表明试验结果与模型拟合度良好^[25-27]。对 P 值进行分析,可看出交互项 AD 和二次

项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对响应值的影响均呈高度显著水平($P < 0.001$);交互项 CD 对响应值的影响呈极显著水平($P < 0.01$)。此外,表中 F 值可以反映各因素对响应值的影响程度,易得出各因素对增重率的影响程度为碳酸钠浓度(C)>三聚磷酸钠浓度(A)>柠檬酸浓度(D)>焦磷酸钠浓度(B)。

表 5 解冻损失率的方差分析结果

Table 5 Analysis of variance results of thawing loss rate

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
回归模型	11.01	14	0.79	17.22	<0.000 1	***
A	0.6	1	0.6	13.11	0.003 1	***
B	0.049	1	0.049	1.08	0.317 2	
C	1.31	1	1.31	28.62	0.000 1	***
D	0.015	1	0.015	0.34	0.571 2	
AB	0.093	1	0.093	2.04	0.177 1	
AC	0.076	1	0.076	1.66	0.220 6	
AD	0.002 5	1	0.002 5	0.055	0.818 6	
BC	0.087	1	0.087	1.91	0.190 7	
BD	0.24	1	0.24	5.15	0.040 9	**
CD	0.002 5	1	0.002 5	0.055	0.818 6	
A ²	0.74	1	0.74	16.27	0.001 4	***
B ²	5.9	1	5.9	129.3	<0.000 1	***
C ²	0.43	1	0.43	9.51	0.008 7	***
D ²	3.68	1	3.68	80.67	<0.000 1	***
残差	0.59	13	0.046			
失拟项	0.5	10	0.05	1.52	0.403 5	
误差项	0.098	3	0.033			
总误差	11.83	29				

注:***表示影响高度显著($P < 0.001$);**表示影响极显著($P < 0.01$)。

由表 5 可知,模型 $P < 0.000 1$,失拟项 $P = 0.403 5$,表明该回归模型可模拟响应值与各因素间的关系。 $R^2 = 0.948 8$,说明试验结果与模型拟合度良好。分析 P 值可知,一次项 A 、 C 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对响应值的影响均呈高度显著水平($P < 0.001$);交互项 BD 对响应值的影响呈极显著水平($P < 0.01$)。分析各项 F 值,可知各因素对解冻损失率的影响程度为碳酸钠浓度(C)>三聚磷酸钠浓度(A)>焦磷酸钠浓度(B)>柠檬酸浓度(D)。

由表 6 可知,模型 $P < 0.000 1$,失拟项 $P = 0.199 5$,表明该回归模型可模拟响应值与各因素间的关系。 $R^2 = 0.957 4$,说明试验结果与模型拟合度良好。分析 P 值可知,一次项 A 、 C 、 D 和交互项 BD 以及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对响应值的影响均呈高度显著水平($P < 0.001$);交互项 AD 、 CD 对响应值的影响呈极显著水平($P < 0.01$)。分析模型 F 值可知,各因素对熟化损失率的影响程度为碳酸钠浓度(C)>柠檬酸浓度(D)>三聚磷酸钠浓度(A)>焦磷酸钠浓度(B)。

表6 熟化损失率的方差分析结果

Table 6 Analysis of variance results of ripening loss rate

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
回归模型	45.49	14	3.25	20.86	<0.000 1	***
A	3.13	1	3.13	20.11	0.000 6	***
B	0.48	1	0.48	3.06	0.104	
C	7.81	1	7.81	50.14	<0.000 1	***
D	6.66	1	6.66	42.76	<0.000 1	***
AB	0.003	1	0.003 025	0.019	0.891 3	
AC	0.4	1	0.4	2.59	0.131 6	
AD	1.22	1	1.22	7.84	0.015	**
BC	0.64	1	0.64	4.11	0.063 7	
BD	1.99	1	1.99	12.76	0.003 4	***
CD	0.82	1	0.82	5.26	0.039 2	**
A ²	8.28	1	8.28	53.15	<0.000 1	***
B ²	7.83	1	7.83	50.29	<0.000 1	***
C ²	9.03	1	9.03	57.97	<0.000 1	***
D ²	6.72	1	6.72	43.15	<0.000 1	***
残差	2.02	13	0.16			
失拟项	1.84	10	0.18	2.99	0.199 5	
误差项	0.18	3	0.062			
总误差	49.25	29				

注:***表示影响高度显著($P<0.001$);**表示影响极显著($P<0.01$)。

表7 感官评分的方差分析结果

Table 7 Analysis of variance results of sensory scores

项目	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
回归模型	10.91	14	0.78	19.78	<0.000 1	***
A	0.56	1	0.56	14.3	0.002 3	***
B	1.27	1	1.27	32.17	<0.000 1	***
C	0.14	1	0.14	3.57	0.081 2	
D	0.083	1	0.083	2.12	0.169 6	
AB	0.062	1	0.062	1.59	0.23	
AC	0.09	1	0.09	2.28	0.154 6	
AD	0.002 5	1	0.002 5	0.063	0.805 1	
BC	1.56	1	1.56	39.66	<0.000 1	***
BD	0.022	1	0.022	0.57	0.463 3	
CD	0.25	1	0.25	6.35	0.025 7	**
A ²	6.3	1	6.3	159.85	<0.000 1	***
B ²	0.063	1	0.063	1.6	0.228 3	
C ²	0.82	1	0.82	20.82	0.000 5	***
D ²	0.76	1	0.76	19.34	0.000 7	***
残差	0.51	13	0.039			
失拟项	0.46	10	0.046	2.77	0.217 2	
误差项	0.05	3	0.017			
总误差	12.05	29				

注:***表示影响高度显著($P<0.001$);**表示影响极显著($P<0.01$)。

由表7可知,模型 $P<0.000 1$;失拟项 $P=0.217 2$,表明该回归模型可模拟响应值与各因素间的关系。 $R^2=0.955 2$,说明试验结果与模型拟合度良好。分析P值可知,一次项A、B和交互项BC以及二次项A²、

C²、D²对响应值的影响均呈高度显著水平($P<0.001$);交互项CD对响应值的影响呈极显著水平($P<0.01$)。分析各项F值可知,各因素对感官评分的影响程度为焦磷酸钠浓度(B)>三聚磷酸钠浓度(A)>碳酸钠浓度(C)>柠檬酸浓度(D)。

2.2.3 响应面交互作用分析

通过将试验数据用Design-Expert 8.0.6进行拟合,绘制三维曲面图^[28],三维图的曲面弧度(或陡峭程度^[25])可反映各因素对响应值的影响程度,如弧度越大,对应因素对响应值的影响则越大^[29];此外,二维图中等高线的形状可直观反映两因素间交互作用的强弱,一般来说,图形越接近椭圆形则交互作用越显著,越接近呈圆形则交互作用越不显著^[28]。各因素对响应值的交互作用影响如图5~图8所示。

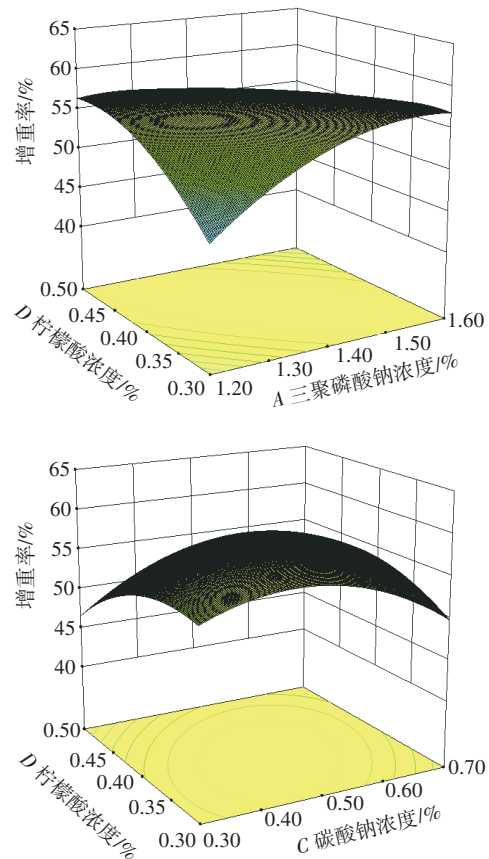


图5 各因素交互作用对增重率的影响

Fig.5 Effect of interaction among various factors on weight gain rate

由方差分析可知,柠檬酸浓度与三聚磷酸钠浓度的交互作用、柠檬酸浓度与碳酸钠浓度的交互作用对增重率的影响均显著。由图5可知,当柠檬酸浓度固定不变时,随着三聚磷酸钠和碳酸钠浓度的增加,增重率先增大后减小。其中柠檬酸与三聚磷酸钠交互作用的增重率比与碳酸钠的下降快,等高线的陡峭曲线更明显^[30],表明其交互作用更显著。

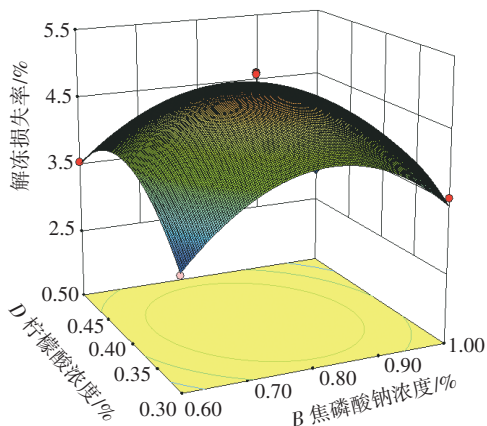


图6 焦磷酸钠和柠檬酸对解冻损失率的响应面分析
Fig.6 Response surface analysis of effects of sodium pyrophosphate and citric acid on thawing loss rate

由方差分析可知,焦磷酸钠浓度与柠檬酸浓度交互作用对解冻损失率影响最显著。分析图6可知,当柠檬酸浓度固定不变时,随着焦磷酸钠浓度增加,解冻损失率逐渐增大并在0.8%左右达到最大,此后逐渐减小。可能是焦磷酸盐随着冻藏时间的延长逐渐被降解为单磷酸盐^[10],从而导致样品的持水力持续下降。

由方差分析可知,柠檬酸浓度与三聚磷酸钠浓度、焦磷酸钠浓度及碳酸钠浓度的交互作用对熟化损失率影响均显著。分析图7可知,当柠檬酸浓度固定不变时,随着三聚磷酸钠、焦磷酸钠及碳酸钠浓度增加,熟

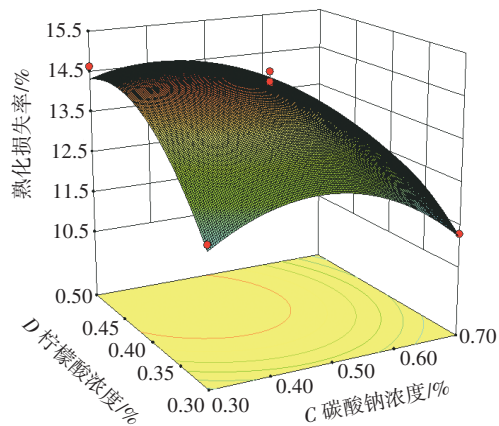


图7 各因素交互作用对熟化损失率的响应面分析
Fig.7 Response surface analysis of interaction among various factors on ripening loss rate

化损失率逐渐增大,此后逐渐减小。其中三聚磷酸钠变化幅度最大,表明三聚磷酸钠对样品在蒸煮过程中保持水分的能力影响较大。

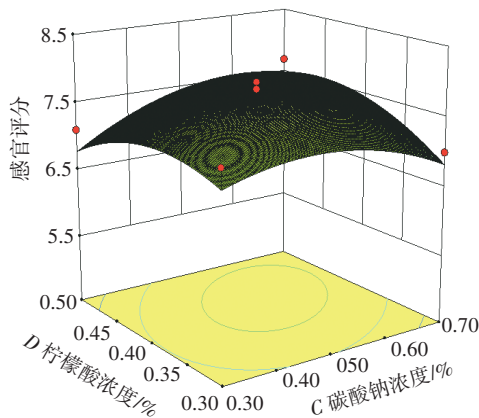
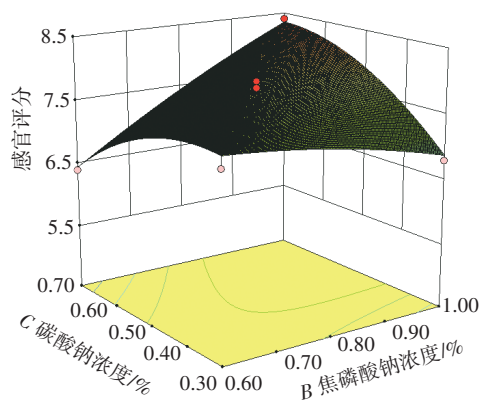
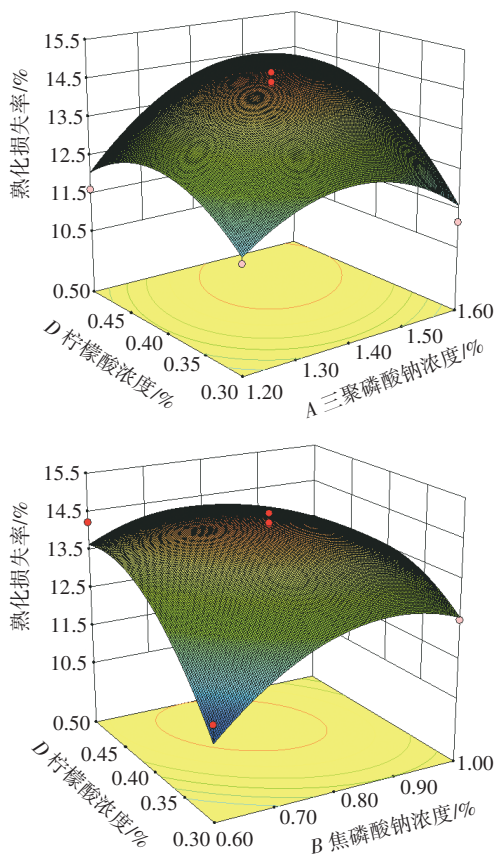


图8 各因素交互作用对感官评分的响应面分析
Fig.8 Response surface analysis of interaction among various factors on sensory scores

由图8可知,当碳酸钠浓度不变时,随着焦磷酸钠浓度增加,感官评分逐渐增大,且在1%时达到最大,此后感官评分逐渐减小,原因是当磷酸钠浓度增大时,肌球蛋白会过度解离,导致肉质松软咀嚼度降低,还会导致鱼片碱味明显,从而影响感官评分;当碳酸钠浓度

不变时,随着柠檬酸浓度增大,感官评分先增大后减小。原因是柠檬酸浓度越大,处理后的鱼片口感略酸且软烂,从而影响感官。此外,碳酸钠浓度与柠檬酸浓度的响应面三维图较碳酸钠浓度与焦磷酸钠浓度的弧度大,且等高线形状呈椭圆形,表明柠檬酸浓度与碳酸钠浓度的交互作用较碳酸钠浓度与焦磷酸钠浓度的更显著。

2.2.4 模型优化及验证

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对黑鱼片的增重率、解冻及熟化损失率和感官评分的试验结果进行优化预测,得到的预测条件为三聚磷酸钠浓度 1.29%、焦磷酸钠浓度 0.97%、碳酸钠浓度 0.68%、柠檬酸浓度 0.5%,在此条件下增重率 53.02%、解冻损失率 3%、熟化损失率 9.65%、感官评分 7.75。为方便操作,将复配水分保持剂配方调整为三聚磷酸钠浓度 1.3%、焦磷酸钠浓度 1%、碳酸钠浓度 0.7%、柠檬酸浓度 0.5%。为了验证该模型的准确性,在此条件下进行 3 次平行验证试验,得到样品增重率 56.01%、解冻损失率 3.93%、熟化损失率 11.37% 和感官评分 7.6。试验结果与预测值接近,表明该回归模型可用于实际值预测。

此外,试验较其他研究有较明显的改善效果,郭祉含^[15]采用 6% 的复合磷酸盐溶液降低了 3.7%,较张学颖等^[13]2.5% 的磷酸盐降低了 0.2%。张晨芳等^[17]使用复配无磷保水剂处理得到 12.2% 的增重率增加了 43.81%;较于淑池等^[21]使用复配无磷保水剂 5.9% 的增重率增加了 50.11%;较张雪莹等^[22]用复合无磷保水剂 5.07% 的增重率增加了 50.94%;较王宁等^[20]用复配无磷保水剂 26.69% 的解冻损失率和 14.63% 熟化损失率分别减小了 22.76% 和 3.26%。综上,本研究工艺可有效降低磷酸盐用量并提高保水效果。

3 结论

采用先浸泡后腌制的工艺探究不同复配水分保持剂对黑鱼片感官品质、增重率和解冻及熟化损失率的影响,通过响应面试验得到最佳配方为三聚磷酸钠浓度 1.3%、焦磷酸钠浓度 1%、碳酸钠浓度 0.7% 和柠檬酸浓度 0.5%。该配方得到的黑鱼片煮制后,增重率 56.01%,解冻损失率、熟化损失率分别为 3.93% 和 11.37%,感官评分为 7.6,表明此复配水分保持剂配方具有良好的保水效果。综上,此配方处理黑鱼片能提高鱼肉持水性,同时在保证产品口感品质的基础上降低磷酸盐的使用量,为黑鱼片预制产品提供新的复配保水剂方案。

参考文献:

[1] LI Tingting, REN Likun, LIU Nan, et al. Effects of different biological antistaling agents on volatile compounds of snakehead fish dur-

ing refrigerated storage by GC-MS technology combined with electronic nose[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(10): 286-299.

[2] 王杨, 许晓军, 丁雪燕, 等. 生态净养和传统养殖乌鳢的营养品质研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8290-8297. WANG Yang, XU Xiaojun, DING Xueyan, et al. Study on nutritional quality of black snake in ecological purification culture and traditional pond[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(22): 8290-8297.

[3] 鱼片搭上预制菜快车[J]. 食品与健康, 2022, 34(5): 5. Fish fillets on the pre made vegetable express[J]. Food and Health, 2022, 34(5): 5.

[4] JOHNSEN S O, JØRGENSEN K B, BIRKELAND S, et al. Effects of phosphates and salt in ground raw and cooked farmed cod (*Gadus morhua*) muscle studied by the water holding capacity (WHC), and supported by P-NMR measurements[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(3): C211-C220.

[5] SCHILLING M W, MARRIOTT N G, ACTON J C, et al. Utilization of response surface modeling to evaluate the effects of non-meat adjuncts and combinations of PSE and RFN pork on water holding capacity and cooked color in the production of boneless cured pork[J]. Meat Science, 2004, 66(2): 371-381.

[6] GUO Heng, QIAN Yi, LI Yingjie, et al. Effects of defrosting temperature on the quality and ultrastructure of frozen mackerel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(12): 49-56.

[7] LIU D S, LIANG L, XIA W S, et al. Biochemical and physical changes of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored at -3 and 0 °C[J]. Food Chemistry, 2013, 140(1/2): 105-114.

[8] SHI L, YANG T, XIONG G Q, et al. Influence of frozen storage temperature on the microstructures and physicochemical properties of pre-frozen perch (*Micropterus salmoides*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 92: 471-476.

[9] CHAN S S, ROTH B, SKARE M, et al. Effect of chilling technologies on water holding properties and other quality parameters throughout the whole value chain: From whole fish to cold-smoked fillets of Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture, 2020, 526: 735381.

[10] 冯慧. 多聚磷酸盐在冷冻罗非鱼肉中的水解以及水产品无磷保水剂的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. FENG Hui. Hydrolysis of polyphosphate in frozen tilapia meat and study on phosphorus-free water-retaining agent for aquatic products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

[11] 刘学军, 周丽丽. 响应面法优化鸭胸肉保水工艺中复合磷酸盐配比[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 65-69. LIU Xuejun, ZHOU Lili. Optimization of composite phosphate for water-holding capacity of duck breast meat[J]. Food Science, 2014, 35(12): 65-69.

[12] CHENG Q F, SUN D W. Factors affecting the water holding capacity of red meat products: A review of recent research advances[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(2): 137-159.

[13] 张学颖, 吕青, 林洪, 等. 三聚磷酸钠对鲈鱼片持水性的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 8177-8178. ZHANG Xueying, LÜ Qing, LIN Hong, et al. Effect of polyphosphate sodium on the water-holding capacity of the pollock fillet[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(17): 8177-8178.

[14] BAUBLITS R T, POHLMAN F W, BROWN A H Jr, et al. Effects of enhancement with differing phosphate types, concentrations, and pump rates, without sodium chloride, on beef biceps femoris instrumental color characteristics[J]. Meat Science, 2006, 72(3): 503-512.

- [15] 郭祉含. 复合磷酸盐对海鲈鱼保水性及体外消化特性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
GUO Zhihan. Effects of compound phosphate on water retention and *in vitro* digestion characteristics of sea bass[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [16] GORSUCH V, ALVARADO C Z. Postrigor tumble marination strategies for improving color and water-holding capacity in normal and pale broiler breast fillets[J]. Poultry Science, 2010, 89(5): 1002-1008.
- [17] 张晨芳, 钟秋平. 复合无磷保水剂对冷冻罗非鱼片保水效果的研究[J]. 食品工业, 2016, 37(10): 100-103.
ZHANG Chenfang, ZHONG Qiuping. Research on water-holding capacity of frozen tilapia fillets by compound non-phosphorous water-retention agent[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 100-103.
- [18] WITEK-KROWIAK A, CHOJNACKA K, PODSTAWCZYK D, et al. Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process[J]. Bioresource Technology, 2014, 160: 150-160.
- [19] CHELLADURAI S J S, MURUGAN K, RAY A P, et al. Optimization of process parameters using response surface methodology: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 1301-1304.
- [20] 王宁, 李亮, 毕凯媛, 等. 复合保水剂对冻藏大黄花鱼持水性及质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 228-232, 238.
WANG Ning, LI Liang, BI Kaiyuan, et al. The influence of composite water retention agent on the water retention and texture properties of the frozen large yellow croaker[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 228-232, 238.
- [21] 于淑池, 周海英. 复合无磷保水剂对冷冻金鲷鱼片的保水效果[J]. 食品工业, 2020, 41(1): 120-124.
YU Shuchi, ZHOU Haiying. The effect of compound phosphorus-free water retaining agent on frozen golden pompano fillets[J]. The Food Industry, 2020, 41(1): 120-124.
- [22] 张雪莹, 申铨日, 朱念, 等. 罗非鱼片无磷保水剂的工艺配方优化[J]. 食品科技, 2015, 40(6): 163-168.
ZHANG Xueying, SHEN Xuanri, ZHU Nian, et al. Optimization the technical formula of non-phosphate additive of water retention agent for Tilapia fillets[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(6): 163-168.
- [23] 张海燕, 吴燕燕, 李来好, 等. 响应面法优化海鲈鱼片脱腥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 143-149.
ZHANG Haiyan, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Optimization of deodorization process for sea bass fillets using response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(11): 143-149.
- [24] 张平, 王莉, 陈亚玲. 乌鱼制作速冻调理鱼片的加工工艺研究[J]. 肉类工业, 2020(10): 23-27.
ZHANG Ping, WANG Li, CHEN Yaling. Study on the processing technology of quick-frozen conditioning fillet of mullet[J]. Meat Industry, 2020(10): 23-27.
- [25] 熊雅雯, 黄卉, 李来好, 等. 响应面法优化冷冻水煮罗非鱼片稳定剂配方[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(23): 225-234.
XIONG Yawen, HUANG Hui, LI Laihao, et al. Optimized stabilizer formulation of frozen boiled Tilapia fillets by response surface methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(23): 225-234.
- [26] 谢春平, 赵良忠, 周晓洁, 等. 响应面法优化全豆腐复配凝固剂工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(10): 4034-4041.
XIE Chunping, ZHAO Liangzhong, ZHOU Xiaojie, et al. Optimization of whole soybean curd compound coagulant using response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(10): 4034-4041.
- [27] 吴燕燕, 赵志霞, 李来好, 等. 响应面法优化复合咸味剂腌制罗非鱼片的工艺[J]. 水产学报, 2019, 43(2): 532-546.
WU Yanyan, ZHAO Zhixia, LI Laihao, et al. Process of optimizing compound salt agent pickled tilapia fillets by response surface methodology[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(2): 532-546.
- [28] 包拾红, 王鑫, 李倩, 等. 响应面法优化酶解红松松仁粕制备抗氧化肽[J]. 中国酿造, 2018, 37(7): 150-155.
BAO Yihong, WANG Luan, LI Qian, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of *Pinus koraiensis* nut meal to prepare antioxidant peptides by response surface methodology[J]. China Brewing, 2018, 37(7): 150-155.
- [29] 陶文斌, 吴燕燕, 李春生, 等. 响应面法优化腌制大黄鱼的低钠复合咸味剂配方[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 136-144.
TAO Wenbin, WU Yanyan, LI Chunsheng, et al. Optimization of low-sodium compound salty agent formula for pickled larimichthys crocea fillets by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 136-144.
- [30] CHEN H, DONG X G, YAO Z F, et al. Effects of prechilling parameters on water-holding capacity of chilled pork and optimization of prechilling parameters using response surface methodology[J]. Journal of Animal Science, 2012, 90(8): 2836-2841.