

超高压作用下扇贝闭壳肌色差变化探析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.01.010

巩雪

哈尔滨商业大学

轻工学院

黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 为了提高超高压作用下扇贝的感官品质, 检验超高压作用的保鲜效果, 对扇贝闭壳肌的色泽变化进行了研究。利用色差计对不同超高压处理条件下的扇贝闭壳肌的 a^* 、 b^* 、 L^* 和 ΔE 进行测定, 找到最优的超高压试验条件, 利用 Design Expert 软件进行试验设计, 并对试验参数进行优化, 得出扇贝闭壳肌超高压处理的最优参数。通过试验得出, 当试验压力为 206 MPa、保压时间为 100 s 时, 扇贝闭壳肌的红度值 a^* 为 -5.01、蓝度值 b^* 为 -12.19、亮度值 L^* 为 67.12、总色差 ΔE 为 11.61, 与扇贝的初始值比较接近。在超高压的作用下, 扇贝闭壳肌的色泽得到了有效改善, 闭壳肌的亮度也显著提高, 为超高压技术在扇贝加工领域的应用提供了理论基础。

关键词: 超高压; 扇贝; 闭壳肌; 色差; 参数优化

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2022)01-0070-11

引文格式: 巩雪. 超高压作用下扇贝闭壳肌色差变化探析 [J]. 包装学报, 2022, 14(1): 70-80.

0 引言

我国是世界上最大的水产养殖国家, 扇贝是主要的养殖产品之一, 因高蛋白、低脂肪和营养丰富, 深受广大消费者的喜爱。扇贝深加工的关键工序是开壳取肉。近年来, 超高压脱壳技术受到食品行业的广泛关注。该技术既能对扇贝进行脱壳和灭菌处理, 又能保持食品原有色泽、天然风味、新鲜度和营养价值。然而, 采用不同的超高压处理工艺参数会使食品的感官品质有所不同。因此, 探索扇贝的最佳超高压处理工艺参数对食品质量和安全具有重要意义。

色差^[1-2]是人们评价食品新鲜度的重要指标。相悦等^[3]研究了花鲈在冰藏过程中鱼肉色泽变化与新鲜度的关系, 结果表明色泽变化是鱼肉中的脂质与

肌红蛋白氧化作用的结果, 能够直观地反映鱼肉的新鲜度。李肖婵等^[4]研究了超高压作用下即食小龙虾的色泽与产品质量和性能的关联性, 发现色差可以直接反映食品中色素的降解程度和脂质的氧化程度, 能够反映小龙虾在储存中的品质劣变程度, 在加工过程中保持食品的色泽至关重要。李永安等^[5]研究了温度对三文鱼色差变化的影响, 结果表明色差与鱼肉中虾青素的含量相关, 可作为评定三文鱼品质的重要指标。杨兆甜等^[6]对色差评价在食品领域的应用情况进行了研究, 得出食品的色泽可以表征食品在储存过程中的品质特性和变化, 能够影响消费者的购买意愿。

本研究将不同超高压工艺参数下处理的扇贝闭壳肌研磨后, 利用色差计测得各个试样的绿红度值(a^*)、蓝黄度值(b^*)和亮度值(L^*), 并根据色

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划基金资助项目(2016YFD0400301)

作者简介: 巩雪(1981-), 女, 辽宁锦州人, 哈尔滨商业大学副教授, 硕士生导师, 主要从事农产品加工技术及装备研究, E-mail: gongxue@hrbcu.edu.cn

差计算公式, 得出不同试验条件下扇贝闭壳肌总色差值(ΔE)的变化规律, 找到最佳超高压脱壳工艺参数, 以为后续扇贝超高压保鲜包装技术的研究提供理论参考。

1 试验

1.1 试验材料与仪器

1) 试验原料

试验所需扇贝为渤海笔架山海域盛产的海湾扇贝, 购买于辽宁省锦州市渤海大学海鲜市场, 购买时尽量挑选大小相近的个体, 扇贝平均质量为(48 ± 5) g, 最长轴直径为(97 ± 5) mm, 在鲜活的状态下运送至试验室进行预处理。包装所需 PE/PP/PA 复合包装袋购买于淘宝佳美塑料包装店铺。

2) 主要试剂

硼酸、高氯酸, 均为分析纯, 购于北京世纪奥科生物技术有限公司; 氢氧化钠、无水乙醇、丙三醇等, 均为分析纯, 购于上海国药集团化学试剂有限公司。

3) 主要仪器

超高压处理设备, HPP.L2-600 型, 天津市华泰森森生物工程技术有限公司; 色差计, CR-400 型, 日本 Konica Minolta 公司; 高速离心机, H1850 型, 湖南湘仪试验室仪器开发有限公司; 分析天平, PL602-L 型, 美国 Mettler Toledo 公司。

1.2 试样处理

1.2.1 扇贝的预处理

将清理完毕的扇贝置于包装袋中, 每个包装袋放入 2 个, 并加入 50 mL 淡盐水保鲜, 封口后进行超高压处理。

1.2.2 超高压处理

对扇贝施加不同强度(100, 200, 300, 400 MPa)的超高压处理, 保压一定的时间(0, 60, 120, 180, 240 s)后取出。

1.3 扇贝闭壳肌色差的测定

将经过超高压处理的扇贝闭壳肌取下并剪碎, 研磨至泥状装入器皿中, 压实、排出气泡。测定时, 每个样品重复搅拌 3 次即 3 组平行实验, 每次记录 L^* 、 a^* 、 b^* 数值, 其中 L^* 表示亮度值($L^*=0$ 指示黑色, $L^*=100$ 指示白色), L^* 值越低表示样品的亮度越小; a^* 表示颜色的绿红度值(a^* 为负值指示绿色, 正值指示品红); b^* 表示颜色的蓝黄度值(b^* 为负值指

示蓝色, 正值指示黄色)。利用记录的 L^* 、 a^* 、 b^* 数值, 通过式(1)计算闭壳肌的色差值 ΔE , 以反映扇贝闭壳肌色差的总体变化^[7-8]。

$$\Delta E = \sqrt{[(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]} \quad (1)$$

式中: L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为未处理的扇贝闭壳肌色差参数初始值。经试验测得初始值分别为: $L_0^*=52.47$, $a_0^*=-4.26$, $b_0^*=-12.37$ 。

2 超高压作用下扇贝闭壳肌色差的变化

色差是扇贝感官特征评价的一个重要指标。扇贝的色泽也是消费者直观判断扇贝新鲜度和品质的主要因素^[9]。超高压作用会促使扇贝闭壳肌发生脂肪氧化、色素降解等反应, 影响闭壳肌的色泽, 从而导致扇贝的市场接受度降低。

2.1 超高压作用下扇贝闭壳肌 a^* 的变化

根据试验结果, 绘制了在不同强度的超高压作用下、保压时间不同时扇贝闭壳肌 a^* 的变化规律曲线, 结果如图 1 所示。

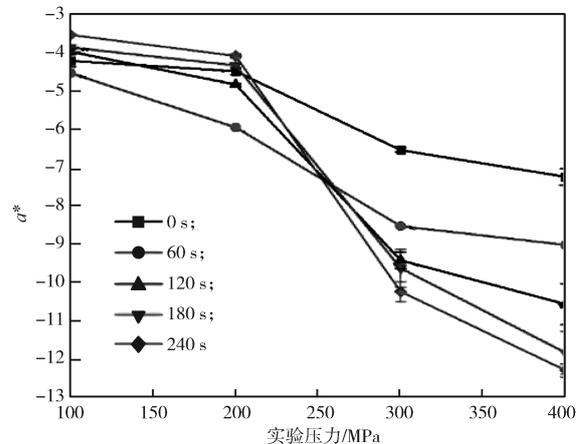


图 1 超高压作用下扇贝闭壳肌 a^* 的变化曲线

Fig. 1 Changes of a^* value of adductor muscle of scallop under ultra high pressure

由图 1 可以看出, 随着试验压力的增加, 扇贝闭壳肌的 a^* 逐渐降低, 当压力超过 200 MPa 后, a^* 开始大幅度降低, 且 a^* 始终为负值, 说明闭壳肌颜色偏向绿色。保压时间越长, 闭壳肌 a^* 的变化幅度越大, 当保压时间为 0 s 时, 试验压力为 100, 400 MPa 时闭壳肌 a^* 分别为 -4.21 和 -7.24, 与初始值相比, a^* 分别提高了 1.17% 和降低了 69.95%; 当保压时间为 240

s时, a^* 随着压力变化的最明显, 当压力为 100 MPa 时, 闭壳肌 a^* 为 -3.53 , 与初始值相比, 闭壳肌的 a^* 升高了 17.13%, 当压力升高至 400 MPa 时, a^* 为 -12.3 , 比初始值降低了 188.73%。

通过对比保压时间为 0 s 和 240 s 时闭壳肌 a^* 的变化程度可以看出, 随着保压时间的延长, a^* 变化幅度越明显, 这主要是由于闭壳肌纤维蛋白质高级结构间的非共价键在超高压的作用下发生改变, 致使肌肉中的肌红蛋白发生氧化反应变为高铁肌红蛋白^[10]。

2.2 超高压作用下扇贝闭壳肌 b^* 的变化

根据试验结果, 绘制了在不同强度的超高压作用下、保压时间不同时扇贝闭壳肌 b^* 的变化规律曲线, 结果如图 2 所示。

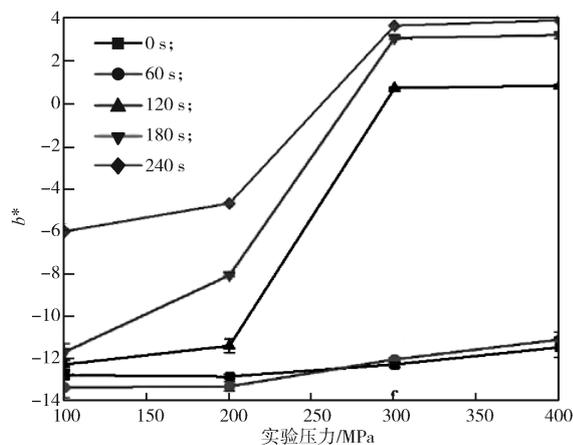


图 2 超高压作用下扇贝闭壳肌 b^* 的变化曲线

Fig. 2 Changes of b^* value of adductor muscle of scallop under ultra high pressure

由图 2 可知, 随着试验压力的增加, 扇贝闭壳肌的 b^* 随之增大, 且由初期的负值逐渐增大为正值, 说明闭壳肌的颜色由蓝色逐渐向黄色转变; 当保压时间为 0 s 和 60 s 时, 随着试验压力的增加闭壳肌 b^* 的变化不明显, 但当保压时间延长至 120 s 甚至更长时, 闭壳肌 b^* 的变化幅度显著增大, 且随着保压时间的延长而增大; 当保压时间为 0 s 时, 试验压力为 100 MPa 和 400 MPa 的闭壳肌 b^* 分别为 -12.81 和 -11.49 , 与初始值 b_0^* 相比, 分别降低了 3.56% 和提高了 7.11%; 当保压时间为 240 s 时, 在不同试验压力下, 闭壳肌 b^* 分别为 -6.00 , -4.68 , 3.73 和 3.99 , 与初始值相比, 分别提高了 51.50%, 62.17%, 130.15% 和 132.26%。由此可见, 保压时间的延长可以提高闭壳肌的 b^* , 且 b^* 随着试验压力的增大而增大, 特别是当压力由 200 MPa 升高至 300 MPa 时, 变化趋势

最为明显。

随着试验压力的增大 b^* 逐渐增大, 由初始的偏向于蓝色逐渐偏向于黄色, 这主要是由于扇贝闭壳肌中含有丰富的虾青素, 它具有比较强的抗氧化性, 当试验压力较低 ($P \leq 200$ MPa) 时, 闭壳肌纤维蛋白质与其体内的虾青素结合力较强, 使闭壳肌的颜色呈现出蓝色; 当试验压力较高 ($P > 200$ MPa) 时, 闭壳肌纤维中蛋白质的高级结构在压力作用下展开, 使蛋白质与虾青素的结合力减弱, 闭壳肌的颜色也逐渐转变成了黄色^[11]。

2.3 超高压作用下扇贝闭壳肌 L^* 的变化

根据试验结果, 绘制了在不同强度的超高压作用下、保压时间不同时扇贝闭壳肌 L^* 的变化规律曲线, 结果如图 3 所示。

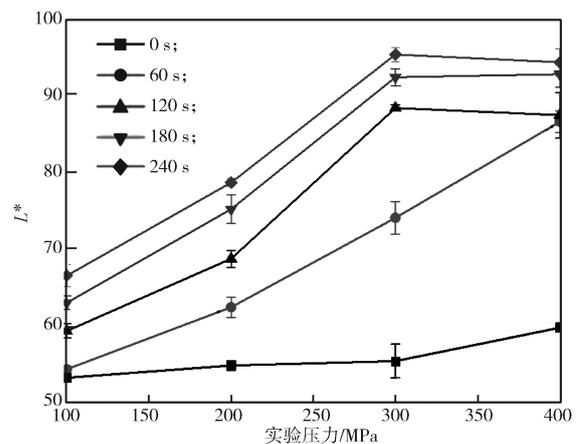


图 3 超高压作用下扇贝闭壳肌 L^* 的变化曲线

Fig. 3 Changes of L^* value of adductor muscle of scallop under ultra high pressure

由图 3 可知, 随着试验压力的增大, 扇贝闭壳肌的 L^* 变化趋势存在着一定的差异。在相同试验压力下, 扇贝闭壳肌的亮度 L^* 随着保压时间的增大而增大, 这是由于保压时间的延长使闭壳肌熟化, 由透明逐渐变成白色。对于同一保压时间而言, 不同强度的试验压力下, 扇贝闭壳肌的 L^* 基本呈现出先升高后趋于稳定的趋势。当试验压力 $P \leq 300$ MPa 时, 扇贝闭壳肌的 L^* 随压力的增大而增大, 这主要是由于压力的作用使扇贝闭壳肌纤维中的蛋白质发生变性, 肌浆蛋白及原纤维蛋白等发生凝聚引起的闭壳肌表面颜色变化, 使闭壳肌的整体亮度提升; 当试验压力 $P > 300$ MPa 时, 闭壳肌表面开始出现熟化现象甚至完全熟化变成白色, 使闭壳肌的品质降低, 亮度变化不大^[12-13]。

2.4 超高压作用下扇贝闭壳肌 ΔE 的变化

扇贝闭壳肌的总色差值 ΔE 是根据 a_0^* 、 b_0^* 、 L_0^* 及各试验压力和保压时间所对应的 a^* 、 b^* 和 L^* 经过计算得到的, 因此闭壳肌的总色差值 ΔE 是在各试验条件下, 闭壳肌的亮度值和色度值综合作用的结果, 它与闭壳肌的 a^* 、 b^* 和 L^* 都存着一定的联系。根据试验结果, 绘制了在不同强度的超高压作用下、保压时间不同时扇贝闭壳肌 ΔE 的变化规律曲线, 结果如图 4 所示。

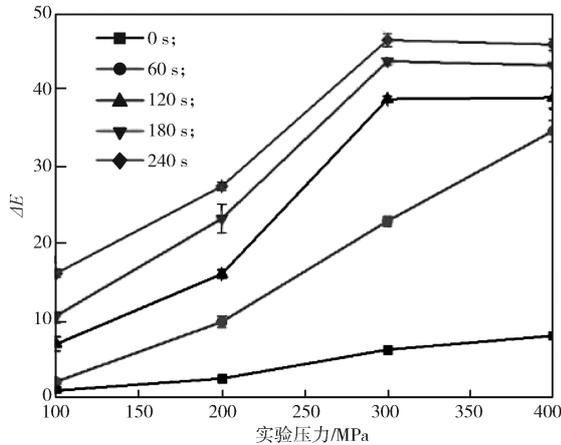


图 4 超高压作用下扇贝闭壳肌 ΔE 的变化曲线

Fig. 4 Changes of ΔE value of adductor muscle of scallop under ultra high pressure

由图 4 可知, 超高压短时间 (0, 60 s) 作用下, 随着试验压力的增大闭壳肌的 ΔE 持续增大; 当保压时间延长至 120 s 甚至更长时, 在一定试验压力范围内 ($P \leq 300$ MPa), ΔE 随着压力的增大而显著增大, 但 $P > 300$ MPa 的试验压力会使闭壳肌的 ΔE 出现小幅降低。对于同一试验压力, 随着保压时间的延长, 闭壳肌的 ΔE 也随之增大。对于同一保压时间, 闭壳肌的色差值随着试验压力的增大, 变化幅度不同。当保压时间为 240 s 时, 各试验压力所对应的 ΔE 值分别为 16.08, 27.42, 46.48 和 45.90, 总色差值显著提升; 试验压力由 200 MPa 增大至 300 MPa 的过程中, ΔE 值提升幅度尤其明显。

在超高压的作用下, 闭壳肌的色度值、亮度值的变化决定了闭壳肌总色差值的变化。根据试验结果, 当试验压力超过 300 MPa 或者保压时间超过 120 s 时, 扇贝闭壳肌的总色差值均大于 12.0, 与新鲜扇贝闭壳肌的色差呈现出较大的差异, 这主要是由于闭壳肌组织中的类胡萝卜素、肌红蛋白和血红蛋白等血红色素在超高压的作用下发生变化, 引起

闭壳肌肌肉纤维颜色的变化, 同时超高压作用导致了闭壳肌纤维蛋白质变质, 使闭壳肌透明度降低, 亮度提升, 色度变化, 这也是导致闭壳肌色差值改变的重要因素。该结论与相关研究^[14-15]所得到的结果是一致的。

3 基于扇贝闭壳肌总色差值的超高压工艺参数优化

3.1 试验因素水平表

根据单因素试验结果和试验数据的显著性分析, 选定了参数优化的试验压力范围为 100~300 MPa、保压时间为 60~180 s, 以试验压力 (X_1) 和保压时间 (X_2) 为自变量, 以扇贝闭壳肌的色差 (a^* : Y_1 ; b^* : Y_2 ; L^* : Y_3 ; ΔE : Y_4) 为响应值, 进行了二因素五水平的试验设计, 因素水平表如表 1 所示。

表 1 试验因素水平表

Table 1 The level of experimental factors

因素	变量水平				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
试验压力 /MPa	58.58	100	200	300	341.42
保压时间 /s	35.15	60	120	180	204.85

注: $\alpha=1.414$ 。

3.2 试验安排与结果

根据中心组合设计 (central composite design, CCD) 原理^[16-19], 进行了试验安排和设计, 以及超高压工艺参数优化试验, 优化试验安排与试验结果如表 2 所示。

3.3 超高压对扇贝闭壳肌色差影响的响应面分析

3.3.1 对扇贝闭壳肌 a^* 的影响

根据表 2 优化试验条件下所得闭壳肌的绿红度值结果, 可以得到扇贝闭壳肌在不同超高压条件下 a^* 的变化规律, 并建立了回归方程:

$$Y_1 = -4.82 - 2.87X_1 - 0.025X_2 - 0.44X_1X_2 - 1.64X_1^2 - 0.711X_2^2 \quad (2)$$

对所建立的回归模型进行方差分析, 分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 建立的回归方程极显著 ($F=1061.00$, $P < 0.0001$), 说明回归模型可以有效地表征响应值 (Y_1) 与试验压力 (X_1)、保压时间 (X_2) 的关系, 失拟项 F 值为 0.48, P 值为 0.3212 > 0.05 , 说明与模型变量相比, 失拟项的影响不显著, 模型比较准确高效; 该回归模型的相关系数 $R^2=0.9907$, 调整后的相关系

数 $R_{\text{adj}}^2=0.9506$ ，两个相关系数的取值都接近于1，证明回归模型具有比较好的拟合度^[20-22]，可以有效地

说明扇贝闭壳肌的绿红度值与试验因素之间的变化规律。

表2 试验安排与结果

Table 2 The experimental arrangement and results

序号	X_1 试验压力 /MPa	X_2 保压时间 /s	Y_1 (a^*)	Y_2 (b^*)	Y_3 (L^*)	Y_4 (ΔE)
1	200.00	35.15	-5.36 ± 0.03	-13.14 ± 0.03	58.73 ± 0.04	6.40 ± 0.04
2	200.00	120.00	-4.81 ± 0.02	-11.41 ± 0.03	68.70 ± 0.04	16.27 ± 0.04
3	300.00	180.00	-9.64 ± 0.01	3.17 ± 0.03	92.72 ± 0.26	43.48 ± 0.23
4	200.00	120.00	-4.84 ± 0.03	-11.41 ± 0.03	68.48 ± 0.46	16.05 ± 0.46
5	300.00	60.00	-8.53 ± 0.03	-12.06 ± 0.04	74.19 ± 0.26	22.14 ± 0.26
6	200.00	204.85	-4.16 ± 0.02	-7.78 ± 0.03	77.34 ± 0.28	25.29 ± 0.28
7	200.00	120.00	-4.83 ± 0.02	-11.41 ± 0.04	68.80 ± 0.31	16.36 ± 0.31
8	341.42	120.00	-10.06 ± 0.07	0.81 ± 0.04	87.98 ± 0.11	38.32 ± 0.10
9	100.00	60.00	-4.55 ± 0.04	-13.41 ± 0.04	54.50 ± 0.31	2.31 ± 0.29
10	58.58	120.00	-4.37 ± 0.04	-12.09 ± 0.05	54.43 ± 0.22	1.98 ± 0.21
11	100.00	180.00	-3.89 ± 0.02	-11.74 ± 0.04	63.13 ± 0.30	10.69 ± 0.30
12	200.00	120.00	1.50 ± 0.03	17.47 ± 0.05	19.64 ± 0.02	5.13 ± 0.10
13	200.00	120.00	1.50 ± 1.07	17.43 ± 0.03	19.69 ± 0.03	5.15 ± 0.07

表3 Y_1 的回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model for Y_1

方差来源	总和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	86.92	5	17.384	1061.00	<0.0001	**
X_1	65.68	1	65.680	4008.43	<0.0001	**
X_2	5.07×10^{-3}	1	5.07×10^{-3}	0.31	0.5955	不显著
X_1X_2	0.78	1	0.780	47.80	0.0002	**
X_1^2	18.73	1	18.730	1142.93	<0.0001	**
X_2^2	3.49	1	3.490	212.96	<0.0001	**
残差	0.83	7	0.119			
失拟项	0.11	3	0.038	0.48	0.3212	不显著
纯误差	0.72	4	0.180			
总和	87.75	12				

注：不显著为 $P \geq 0.05$ ；*代表显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)；**代表极显著 ($P < 0.01$)，下同。

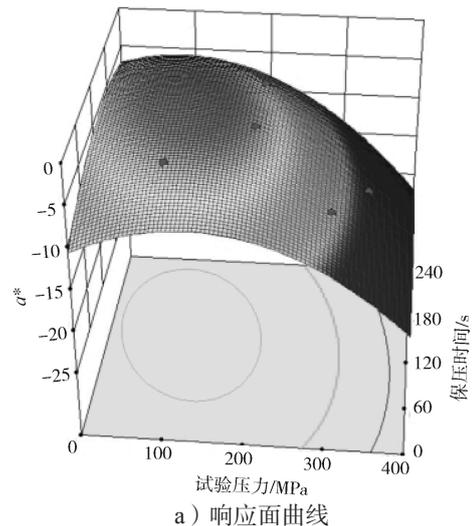
在 Y_1 的回归模型中，除了一次项 X_2 不显著之外，其它的一次项、二次项和交互项均呈现出极显著性，说明各试验因素及其交互作用对响应值变化非常明显，即闭壳肌的 a^* 与试验压力、保压时间具有很强的非线性关联^[23-24]。

根据所建立的回归方程，可以绘制响应值与试验因素间相应的响应面曲线和等高线，拟合得到的响应面曲线的陡峭程度和等高线的形状可以直观地反映各试验因素与响应值之间的变化趋势及交互作用的影响。根据试验数据和回归模型，可以得到扇贝闭壳肌 a^* 与试验压力、保压时间之间的响应面曲线和等高线，结果如图5所示。

由图5可以看出，响应面曲线具有较大的陡峭程

度，说明扇贝闭壳肌绿红度值与试验因素之间的关系极显著；等高线呈现出比较标准的椭圆形且最大值集中在一个区域内，说明试验因素的交互作用非常显著，对响应值的变化量影响也很明显，这与方差分析所得的结论基本一致。由等高线图还可以看出，扇贝闭壳肌的 a^* 最大值集中在 50~200 MPa、60~190 s 所围成的椭圆范围内；再根据响应面得到闭壳肌 a^* 的极大值为 -3.495，取得该极值时对应的试验参数为试验压力 100 MPa、保持 180 s。

根据所得优化结果，在优化试验条件下进行了3次重复试验，得到扇贝闭壳肌 a^* 的平均值为 -3.63，误差约为 3.86%，说明该模型可以比较准确地预测不同试验条件下扇贝闭壳肌的 a^* 变化。



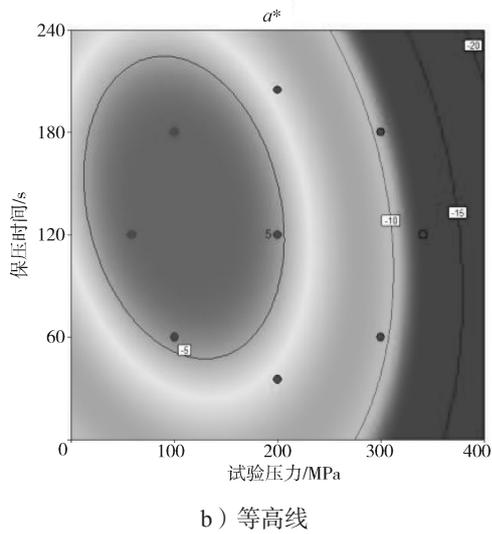


图5 扇贝闭壳肌 a^* 与试验因素的响应面曲线和等高线

Fig. 5 Response surface curves and contours of scallop adductor muscle a^* and experimental factors



彩图

3.3.2 对扇贝闭壳肌 b^* 的影响

根据表2优化试验的结果,得到了扇贝闭壳肌蓝黄度值随试验条件变化的规律,并建立了回归方程:

$$Y_2 = -11.40 + 4.32X_1 + 3.06X_2 + 3.38X_1X_2 + 2.77X_1^2 + 0.35X_2^2 \quad (3)$$

对所建立的回归模型进行方差分析,结果如表4所示。回归方程中的各变量与响应值之间影响的显著性取决于 F 检验的结果, F 值越大、 P 值越小表示显著程度越高。

表4 Y_2 的回归模型方差分析

Table 4 The variance analysis of regression model of Y_2

方差来源	总和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	323.07	5	64.61	38.64	<0.0001	**
X_1	149.02	1	149.02	89.12	<0.0001	**
X_2	74.94	1	74.94	44.82	0.0003	**
X_1X_2	45.77	1	45.77	27.37	0.0012	**
X_1^2	53.35	1	53.35	31.91	0.0008	**
X_2^2	0.87	1	0.87	0.52	0.4932	不显著
残差	17.70	7	2.53			
失拟项	11.70	3	3.90	2.60	0.1200	不显著
纯误差	6.00	4	1.50			
总和	340.77	12				

由表4可知,所建立回归方程的 $F=38.64$, $P<0.0001$,说明该回归模型极显著;失拟项 $P=0.1200>0.05$ 不显著,说明该回归方程可以很好地反映试验因素 X_1 、 X_2 与扇贝闭壳肌 b^* 之间的关系;

X_1 、 X_2 、 X_1X_2 和 X_1^2 对响应值 Y_2 的影响极显著 ($P<0.01$), X_2^2 影响不显著 ($P>0.05$),由此可以判断,试验因素对扇贝闭壳肌 b^* 的影响由强至弱为: X_1 (试验压力)、 X_2 (保压时间)。

根据方差分析结果(见表4),所建立的各试验因素 X_1 、 X_2 与扇贝闭壳肌 b^* 之间回归方程的相关系数 $R^2=0.9650$,调整相关系数 $R^2_{\text{adj}}=0.9401$,说明该回归方程的拟合度比较高,可以有效地预测扇贝闭壳肌 b^* 与试验压力、保压时间之间的关系,试验数据的离散程度较小,可靠性较高。

根据试验数据和回归模型,可以得到扇贝闭壳肌蓝黄度值与试验压力、保压时间之间的响应面曲线和等高线,结果如图6所示。

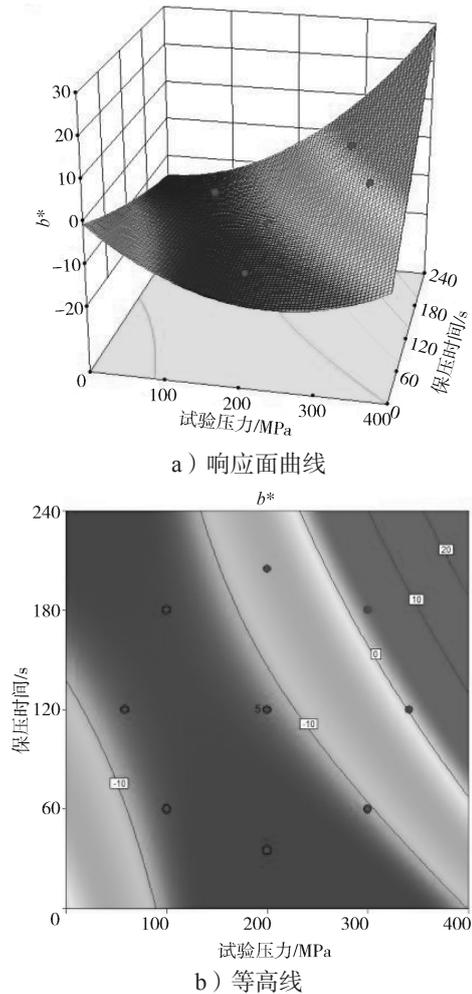


图6 扇贝闭壳肌 b^* 与试验因素的响应面曲线和等高线

Fig. 6 The response surface curve and contour line of scallop adductor muscle b^* and experimental factors



彩图

由图6可知,随着试验压力增大、保压时间延长,扇贝闭壳肌的 b^* 呈现先降低再升高的变化趋势,这与单因素所得试验结果相符。响应曲面的坡度比较明显,说明两因素对扇贝闭壳肌 b^* 的影响比较显著,这与回归方程方差分析结果一致。等高线形状趋近于椭圆形,说明试验压力和保压时间的交互作用对扇贝闭壳肌 b^* 的影响极显著,这一结果也与方差分析结果一致。

根据 Design-Expert 10.0 软件的分析结果,可以确定当试验压力 $X_1=300$ MPa、保压时间 $X_2=180$ s时,扇贝闭壳肌 b^* 取得极大值为3.043。根据优化试验条件进行3次重复试验,测定扇贝闭壳肌 b^* 平均值为3.140,误差约为3.19%,说明预测值与实测值比较接近,建立的回归模型能比较准确地预测扇贝闭壳肌 b^* 与各试验因素之间的变化关系。

3.3.3 对扇贝闭壳肌 L^* 的影响

根据表2的试验结果,本研究对扇贝闭壳肌 L^* 与各试验因素的变化规律进行分析,得到扇贝闭壳肌 L^* 与试验压力、保压时间之间的关系。建立的回归方程如下:

$$Y_3 = 68.68 + 12.09X_1 + 6.68X_2 + 2.48X_1X_2 + 1.64X_1^2 + 0.055X_2^2 \quad (4)$$

对所建立的回归模型进行方差分析,结果如表5所示。

表5 Y_3 的回归模型方差分析

Table 5 The variance analysis of regression model for Y_3

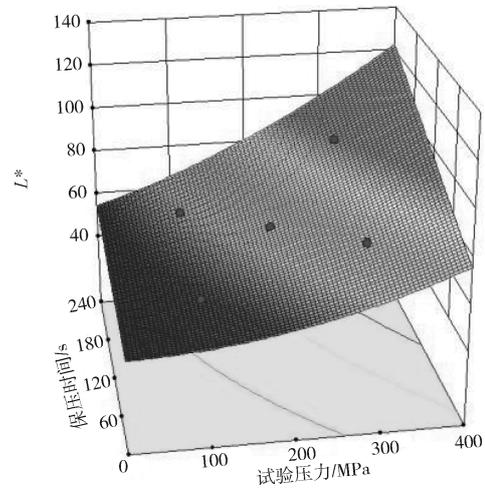
方差来源	总和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	1570.40	5	314.08	425.51	<0.0001	**
X_1	1169.51	1	1169.51	1584.43	<0.0001	**
X_2	357.49	1	357.49	484.33	<0.0001	**
X_1X_2	24.50	1	24.50	33.20	0.0007	**
X_1^2	18.72	1	18.72	25.36	0.0015	**
X_2^2	0.021	1	0.02	0.03	0.8701	不显著
残差	13.21	7	1.89			
失拟项	5.37	3	1.79	0.91	0.6100	不显著
纯误差	7.84	4	1.96			
总和	1583.61	12				

由表5中的方差分析可知,建立的回归方程极显著($F=425.51$, $P<0.0001$),失拟项 P 值为 $0.6100>0.05$,为不显著,说明模型的拟合度很好,可以很好说明扇贝闭壳肌 L^* 的变化规律。模型的相关系数 R^2 为0.9944,调整相关系数 R_{adj}^2 为0.9769,变异系数 $C.V.=1.23\%$,说明所建立的回归方程能够很好地预测超高压处理后闭壳肌的亮度值(Y_3)与试

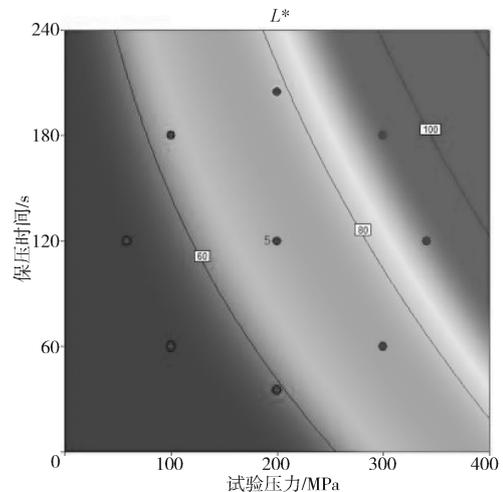
验压力(X_1)和保压时间(X_2)的变化关系。

由表5中的回归系数显著性分析结果可知,一次项 X_1 和 X_2 、交互项 X_1X_2 和二次项 X_1^2 对闭壳肌亮度值的影响均具有极显著性($P<0.01$)。比对各试验因素的 F 值可知,试验因素对扇贝闭壳肌 L^* 的影响由强到弱为: X_1 (试验压力)、 X_2 (保压时间)。

根据试验数据和回归模型,可以得出闭壳肌亮度值与试验压力、保压时间之间的响应面曲线和等高线,结果如图7所示。



a) 响应面曲线



b) 等高线

图7 扇贝闭壳肌 L^* 与试验因素的响应面曲线和等高线

Fig. 7 Response surface curve and contour line of scallop adductor muscle L^* and experimental factors



彩图

由图7可知,当试验压力增加、保压时间延长时,

扇贝闭壳肌 L^* 的变化规律性不强。由等高线图可以看出, 等高线轮廓趋近于椭圆形, 这也进一步说明了试验因素交互作用的显著性。扇贝闭壳肌 L^* 与试验因素 X_1 、 X_2 的响应面曲线比较陡峭, 说明试验因素对响应值的影响比较显著, 这与方差分析的结果一致。

扇贝闭壳肌 L^* 与试验因素 X_1 、 X_2 的响应面和等高线的分析结果表明, 当试验压力 $X_1=300$ MPa、保压时间 $X_2=180$ s 时, 闭壳肌亮度取得极大值为 91.60。在优化试验条件下进行了 3 次重复试验, 得到扇贝闭壳肌 L^* 平均值为 92.32, 这与预测值比较接近, 说明本研究建立的回归方程能够很好地反映闭壳肌亮度值与试验压力、保压时间之间的关系。

3.3.4 对扇贝闭壳肌 ΔE 的影响

利用 Design-Expert 10.0 软件进行试验设计, 并对表 2 中的扇贝闭壳肌 ΔE 与试验压力、保压时间进行二次回归拟合。建立的二元二次回归方程为:

$$Y_4 = 16.25 + 13.00X_1 + 7.05X_2 + 3.24X_1X_2 + 2.36X_1^2 + 0.21X_2^2 \quad (5)$$

对所建立的回归模型进行方差分析, 结果如表 6 所示。

表 6 Y_4 的回归模型方差分析

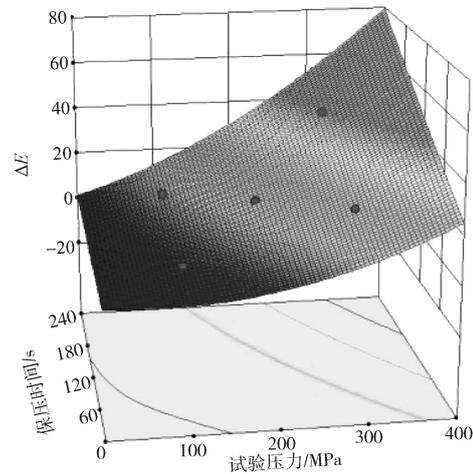
Table 6 The variance analysis of regression model for Y_4

方差来源	总和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1831.38	5	366.28	372.82	<0.0001	**
X_1	1352.33	1	1352.33	1376.51	<0.0001	**
X_2	398.11	1	398.11	405.23	<0.0001	**
X_1X_2	41.99	1	41.99	42.74	0.0003	**
X_1^2	38.89	1	38.89	39.85	0.0004	**
X_2^2	0.31	1	0.31	0.32	0.5905	不显著
残差	7.47	7	1.07			
失拟项	6.81	3	2.27	13.76	0.6300	不显著
纯误差	0.66	4	0.17			
总和	1838.85	12				

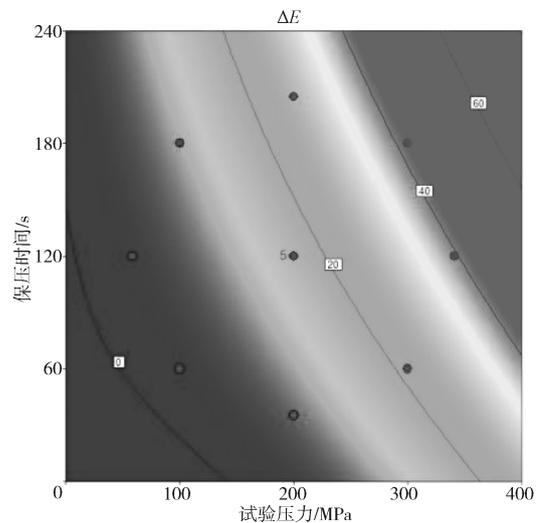
由表 6 可知, 回归模型呈现出极显著性 ($F=372.82$, $P<0.0001$), 失拟项的 F 值为 13.76, P 值为 $0.6300>0.05$, 相关系数 $R^2=0.9936$, 调整相关系数 $R^2_{adj}=0.9719$, 变异系数 $C.V.=5.56\%$, 说明所建立的模型拟合程度良好, 并可以很好地说明扇贝闭壳肌总色差值与试验因素之间的变化规律。此外, 在回归方程中除了 X_2^2 以外的其他各项 (包括一次项、交互项和二次项) 对响应值的影响都比较显著, 均显示出了极强的显著性 ($P<0.01$)。根据各因素的 F 值结果可以看出, 试验因素对扇贝闭壳肌

ΔE 的影响由强到弱为: X_1 (试验压力)、 X_2 (保压时间)。

为了直观地探究试验因素与响应值之间的关系, 根据试验数据和回归模型, 绘制了闭壳肌总色差值与试验压力、保压时间之间响应面曲线和等高线, 结果如图 8 所示。



a) 响应面曲线



b) 等高线

图 8 扇贝闭壳肌色差值与试验因素的响应面曲线和等高线

Fig. 8 Response surface curve and contour line of scallop color difference value and experimental factors



彩图

由图 8 可知, 随着试验压力增加、保压时间延长, 扇贝闭壳肌的总色差值逐渐增大, 响应面曲线具有较大坡度, 等高线也趋于椭圆形, 这也说明了试验因素的交互作用比较明显, 这与方差分析所得结果

一致。

扇贝闭壳肌 ΔE 与试验因素 X_1 、 X_2 的响应面和等高线的分析结果表明, 当试验压力 $X_1=300$ MPa、保压时间 $X_2=180$ s 时, 闭壳肌 ΔE 取得极大值为 43.12。在优化试验条件下进行了 3 次重复试验, 得出该条件下闭壳肌总色差值的平均值为 43.74, 实测值与预测值之间的误差为 1.44%, 这说明回归模型可以很好地反映出闭壳肌总色差值与试验压力、保压时间之间的响应关系。

为了简化试验, 基于单因素试验结果, 利用 CCD 试验设计方法进行优化, 得到扇贝闭壳肌色差取得极大值时所对应的工艺参数, 并利用 Design-Expert 软件进行分析计算, 得到超高压处理扇贝的最佳工艺参数为试验压力 206 MPa、保压时间 100 s。此条件下扇贝闭壳肌的 $a^*=-5.01$, $b^*=-12.19$, $L^*=67.12$, $\Delta E=11.61$, 该色差值与初始值比较接近。可见, 本优化工艺提高了扇贝闭壳肌的亮度, 改善了扇贝闭壳肌色泽。

4 结论

在不同超高压条件下处理扇贝, 利用色差计测得扇贝闭壳肌的 a^* 、 b^* 和 L^* , 并根据色差计算公式, 得出不同试验条件下扇贝闭壳肌的 ΔE , 通过研究 ΔE 的变化规律, 找到最佳试验条件, 得到结论如下。

1) 随着试验压力的增大, 扇贝闭壳肌 a^* 逐渐降低, b^* 随之提高, L^* 呈现出先升高后稳定的趋势, ΔE 则呈现出先升高后降低的趋势。

2) 对于同一试验压力, 随着保压时间的延长, 闭壳肌的总色差值 ΔE 随之增大, 对于同一保压时间, 当试验压力由 200 MPa 增至 300 MPa 的过程中, ΔE 提升幅度尤为明显。

3) 通过超高压试验和优化试验, 得到扇贝闭壳肌色差取得最优值时的工艺参数为: 试验压力 $P=206$ MPa、保压时间 $t=100$ s。此时扇贝的色差值与初始值比较接近, 红度和蓝度值得到改善, 亮度值提高, 即改善了扇贝闭壳肌的色泽和感官。

参考文献:

- [1] 师 莹, 陈 娅, 符宜谊, 等. 色差计在食品品质检测中的应用 [J]. 食品工业科技, 2009, 30(5): 373-375.
- [2] 徐吉祥, 楚炎沛. 色差计在食品品质评价中的应用 [J]. 现代面粉工业, 2010, 24(3): 43-45.
- [3] 相 悦, 孙承锋, 李来好, 等. 花鲈冰藏过程中肌原纤维蛋白生化特性与新鲜度变化的相关性 [J]. 水产学报, 2021, 45(2): 283-295.
- [4] 李肖婵, 林 琳, 朱亚军, 等. 巴氏杀菌和超高压杀菌对即食小龙虾货架期的影响 [J]. 渔业现代化, 2020, 47(4): 83-88.
- [5] 杨永安, 李静静, 刘建福, 等. 不同温度波动对冻藏三文鱼色差和质构的影响 [EB/OL]. 食品与发酵工业. [2021-10-12]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025815>.
- [6] 杨兆甜, 李方巍, 王震昊, 等. 食品颜色评价及在食品工业中的应用 [EB/OL]. 食品工业科技. [2021-10-12]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110045>.
- [7] BELTRÁN-LUGO A I, MAEDA-MARTÍNEZ A N, PACHECO-AGUILAR R, et al. Seasonal Variations in Chemical, Physical, Textural, and Microstructural Properties of Adductor Muscles of Pacific Lions-Paw Scallop (*Nodipecten Subnodosus*) [J]. Aquaculture, 2006, 258(1/2/3/4): 619-632.

- [8] 刘蓄瑾. 超高压杀菌对贝类质构及可消化性的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2016.
LIU Xujin. Effects of Ultra-High Pressure Sterilization on Texture and Digestibility of Shellfish[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2016.
- [9] 魏心如, 李伟明, 闫海鹏, 等. 冷却鸡肉肉色色差计评定方法标准化[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 189-193.
WEI Xinru, LI Weiming, YAN Haipeng, et al. Standardization of Color Measurement of Chilled Chicken Using Colorimeter[J]. Food Science, 2014, 35(24): 189-193.
- [10] GROSSI A, SØLTOFT-JENSEN J, KNUDSEN J C, et al. Synergistic Cooperation of High Pressure and Carrot Dietary Fibre on Texture and Colour of Pork Sausages[J]. Meat Science, 2011, 89(2): 195-201.
- [11] 陈少华, 胡志和, 吴子健, 等. 超高压技术对南美白对虾脱壳及加工性能的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 11-16.
CHEN Shaohua, HU Zhihe, WU Zijian, et al. Effect of Ultra-High Pressure Treatment on Shucking of Penaeus Vannamei Boone and Its Processing Properties[J]. Food Science, 2014, 35(22): 11-16.
- [12] JUNG S, GHOUL M, DE LAMBALLERIE-ANTON M. Influence of High Pressure on the Color and Microbial Quality of Beef Meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(6): 625-631.
- [13] 黄万有, 刘书成, 吉宏武, 等. 超高压处理条件下的虾仁品质变化动力学[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 100-105, 115.
HUANG Wanyou, LIU Shucheng, JI Hongwu, et al. Kinetics of Quality Change of Peeled Shrimp (Litopenaeus Vannamei) by Ultra-High Pressure[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(22): 100-105, 115.
- [14] SAHIN S, SUMNU S G. Physical Properties of Foods[M]. New York: Springer, 2006: 124-150.
- [15] MARCOS B, KERRY J P, MULLEN A M. High Pressure Induced Changes on Sarcoplasmic Protein Fraction and Quality Indicators[J]. Meat Science, 2010, 85(1): 115-120.
- [16] 范云丽, 徐华凤, 王雪燕. 响应面分析法优化苯酯助剂合成工艺[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(4): 69-73.
FAN Yunli, XU Huafeng, WANG Xueyan. Optimization of Synthesis Process of Phenyl Ester Additives by Response Surface Methodology[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2016, 33(4): 69-73.
- [17] 巩雪, 常江, 孙智慧, 等. 扇贝超高压保鲜包装实验[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 49-52.
GONG Xue, CHANG Jiang, SUN Zhihui, et al. Experimental Study on the High-Pressure Fresh-Keeping Packaging of Scallop[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 49-52.
- [18] 张磊, 王锦旭, 杨贤庆, 等. 响应面法优化合浦珠母贝糖胺聚糖咀嚼片的制备工艺[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 159-166.
ZHANG Lei, WANG Jinxu, YANG Xianqing, et al. Optimization of Preparation Technology of Glycosaminoglycans Chewable Tablets from Pinctada Martensii by Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 159-166.
- [19] 沈虹力, 邓尚贵, 方国宏, 等. 响应面法优化冷冻即食鱿鱼的加工工艺研究[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 132-136.
SHEN Hongli, DENG Shanggui, FANG Guohong, et al. Optimization of Process of Frozen Instant Squid by Response Surface Methodology[J]. The Food Industry, 2018, 39(10): 132-136.
- [20] GONG Xue, CHANG Jiang, LI Danting, et al. Ultra High-Pressure Preservation Technology and Parameter Optimization of Scallop[J]. EKOLOJI, 2018, 27(106): 1697-1704.
- [21] 乔梦丹, 王微, 贺阳, 等. 响应面法优化人参-仙人掌果酒的发酵工艺[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 170-174.
QIAO Mengdan, WANG Wei, HE Yang, et al. Optimization of Fermentation Technology of Panax Ginseng and Opuntia Ficus-Indica Wine by Response Surface Methodology[J]. China Brewing, 2017, 36(11): 170-174.
- [22] 刘云姣, 张海燕, 刘淑晗, 等. 响应面优化南极磷虾蛋白酶解工艺及蛋白肽组分分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(1): 144-151, 280.
LIU Yunjiao, ZHANG Haiyan, LIU Shuhan, et al. Response Surface Optimization of Proteolytic Process and Protein Peptide Composition Analysis of Antarctic Krill[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(1): 144-151, 280.
- [23] 巩雪. 超高压作用下扇贝闭壳肌质构变化实验研究[J]. 数字印刷, 2020(1): 64-76.
GONG Xue. Experimental Study on Texture Changes of Scallop Shell Under Ultra-High Pressure[J]. Digital Printing, 2020(1): 64-76.
- [24] 邹明辉, 李来好, 郝淑贤, 等. 响应面法优化南美

白对虾虾仁无磷保水工艺 [J]. 食品科学, 2010, 31(20): 159-165.
ZOU Minghui, LI Laihao, HAO Shuxian, et al.
Optimization of Formulation of a Non-Phosphate Water-Holding Agent for Penaeus Vannamei by Response Surface

Methodology[J]. Food Science, 2010, 31(20): 159-165.

(责任编辑: 李玉华)

Study on Color Difference of Scallop Adductor Muscle Under Ultra High Pressure

GONG Xue

(Institute of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: In order to improve the sensory quality of scallop, the preservation effect of ultra-high pressure was tested and the color change of scallop adductor muscle under ultra-high pressure was studied. The a^* , b^* , L^* and ΔE of scallop adductor muscle under different ultra-high pressure treatment conditions were obtained by color difference meter and the optimal ultra-high pressure test conditions were found. The experimental parameters were optimized and the experimental design was carried out by using design expert software, and the optimal parameters of scallop adductor muscle ultra-high pressure treatment were obtained. The results showed that when the test pressure was 206 MPa and the pressure holding time was 100 s, the redness value a^* of scallop adductor muscle was -5.01 , the blue value b^* was -12.19 , the brightness value L^* was 67.12 and the total color difference ΔE was 11.61 , close to the initial values of the scallop. The brightness and color difference of scallop adductor muscle have been improved under the action of ultra-high pressure, which provided a theoretical basis for the application of ultra-high pressure technology in scallop processing.

Keywords: ultra high pressure; scallop; adductor muscle; color difference; parameter optimization