

顾俊浩, 尹明雨, 王锡昌. 墨鱼干碱水-纯水组合复水工艺优化及复水前后质构特性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 181-189. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120190

GU Junhao, YIN Mingyu, WANG Xichang. Optimization of Alkaline Solution-Pure Water Combined Rehydration Process for Dried Cuttlefish and Its Texture Properties before and after Rehydrating[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 181-189. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120190

· 工艺技术 ·

# 墨鱼干碱水-纯水组合复水工艺优化及 复水前后质构特性

顾俊浩, 尹明雨, 王锡昌\*

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

**摘要:**目的: 探究墨鱼干复水最优工艺参数及其复水前后的质构变化。方法: 通过先用碱水后用纯水的组合复水方式进行处理, 以复水率和蛋白损失率为优化指标进行条件优化, 随后对墨鱼干复水前后的质构特性以及蛋白质二级结构、组织形态等相关指标进行分析。结果: 碱水处理墨鱼干的最佳条件为: 碳酸钠浓度 0.50%、时间 2.0 h、温度 50 °C、料液比 1:20 g/mL; 在此基础上, 进行纯水处理的最佳条件为: 时间 1.0 h、温度 50 °C、料液比为 1:20 g/mL。两步处理后, 墨鱼干的复水率为 261.10%±7.10%, 蛋白损失率为 16.80%±0.74%。复水处理使墨鱼干的硬度、胶着性和咀嚼性显著降低, 而弹性则显著上升 ( $P<0.05$ ), 并使肌原纤维蛋白的结构折叠, 且肌纤维的间隙增加。结论: 本研究明确墨鱼干最优复水参数并改善其质构特性, 为墨鱼干的高质化加工利用提供理论参考。

**关键词:** 墨鱼干, 复水工艺, 复水率, 蛋白损失率, 质构特性

中图分类号: TS254.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)01-0181-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120190



本文网刊:

## Optimization of Alkaline Solution-Pure Water Combined Rehydration Process for Dried Cuttlefish and Its Texture Properties before and after Rehydrating

GU Junhao, YIN Mingyu, WANG Xichang\*

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Objective: Investigation of optimized rehydration process of dried cuttlefish and its textural changes before and after rehydrating. Methods: The combination rehydration method was conducted by two-step process with alkaline solution first and pure water next, the conditions were optimized based on the rehydration ratio and protein loss. Then the textural properties of dried cuttlefish before and after rehydrating, as well as protein secondary structure, tissue morphology and other related indexes were analyzed. Results: The conditions for alkaline solution treatment of dried cuttlefish were the concentration of sodium carbonate solution 0.50%, 2.0 h of the rehydrating time, 50 °C of the rehydrating temperature, the ratio of material to liquid being 1:20 g/mL. On this basis, the optimal conditions for pure water treatment were 1.0 h of the rehydrating time, 50 °C of the rehydrating temperature, the ratio of material to liquid being 1:20 g/mL, with the rehydration ratio and protein loss of the rehydrated dried cuttlefish were 261.10%±7.10% and 16.80%±0.74% respectively. The rehydration treatment reduced the hardness, gumminess and chewiness of dried cuttlefish while the springiness increased significantly ( $P<0.05$ ), and resulted in structural folding of myofibrillar protein, and enlarged the gaps between muscle fibers. Conclusion: This study clarifies the optimal rehydration parameters of dried cuttlefish and improves its textural properties to provide theoretical reference for the high-quality processing and utilization of dried cuttlefish.

收稿日期: 2023-12-19

作者简介: 顾俊浩 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与品质评价, E-mail: 1924658633@qq.com。

\* 通信作者: 王锡昌 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与品质评价, E-mail: xcwang@shou.edu.cn。

**Key words:** dried cuttlefish; rehydration process; rehydration ratio; protein loss; texture properties

墨鱼属头足类,是我国的四大海产之一,营养价值高<sup>[1]</sup>、味道鲜美、质地独特,深受消费者喜爱<sup>[2]</sup>,中国渔业年鉴<sup>[3]</sup>显示,墨鱼捕捞产量连续十年占我国海洋捕捞产量的1.5%左右,因此墨鱼是一种珍贵的食材,具有较高的经济价值。新鲜的墨鱼极易腐烂变质,一般将其干燥制成墨鱼干以延长货架期<sup>[4]</sup>。这也使得复水处理<sup>[5]</sup>成为墨鱼干在烹饪前的必要加工工序。

墨鱼干的复水方式以纯水法和碱水法为主<sup>[6]</sup>。纯水法复水操作简单、无污染,但复水时间往往较长。碱水法复水则通过碱的水解和中和效应<sup>[7]</sup>提高墨鱼干的持水能力,因此改善了其复水效果<sup>[8]</sup>。碱水法复水的程度受到其腐蚀性的影响,需要进行控制,碱水处理程度过高,碱水将分解墨鱼干的组织,且可能导致碱液残留在组织中,并带来苦味,其食用价值大幅下降。因此碱水处理后,往往需要在纯水中进行复水,以使墨鱼干进一步吸收水分并洗脱出部分残留在组织中的碱液<sup>[9]</sup>。

目前,对于墨鱼干的复水条件大多数都来源于经验,而且对其复水后的品质控制也缺少科学的数据验证,无法指导消费者和产业准确控制复水的条件。因此深入探究优化墨鱼干复水工艺,提高墨鱼干复水效果的同时,尽可能降低组织分解程度,进一步提高墨鱼干经济效益的研究工作亟需开展。本文以墨鱼干为研究对象,采用两步复水法,以单因素和正交试验优化每一步复水处理的工艺参数,并分析复水处理对墨鱼干质构特性和组织状态的影响,以期对墨鱼干复水工艺的指导及其复水后产品的高质化加工提供理论参考。

## 1 材料与方

### 1.1 材料与仪器

墨鱼干 从广西北海市场上购买获得,干燥方式为晒制干燥,经包装后运送至实验室;碳酸钠 上海吉至生化科技有限公司;五水硫酸铜、碘化钾 中国阿拉丁有限公司;Tris、四水合酒石酸钠、浓盐酸、浓硫酸 国药集团化学试剂有限公司;纯度均为分析纯。

BT-227S 电子分析天平 赛多利斯科学仪器有限公司;HWS-24 电热恒温水浴锅 上海恒科学仪器有限公司;UV-1800PC 紫外分光光度计 美谱达仪器有限公司;FE-28 台式 pH 计 梅特勒-托利多集团;TA.XT Plus 质构仪 英国 SMS 公司;FD-1C-50 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司;H2050R 高速冷冻离心机 长沙湘仪有限公司;Spotlight 400 傅里叶变换红外光谱仪 珀金埃尔默股份有限公司;Eclipse E100 光学显微镜 日本尼康公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 墨鱼干预处理 墨鱼干去除腕足和石灰质内壳后,取外套膜,并分割成 2 cm×2 cm 的正方形块,用自封袋密封后,于-40 ℃ 冰箱中贮藏备用。实验前将其置于空气中解冻 0.5 h 以上,解冻时用厨房纸包裹以吸收产生的冷凝水。

1.2.2 碱水复水处理的优化 将分割的墨鱼干置于聚乙烯瓶中,加入碳酸钠水溶液,随后将瓶口密封,以减少水分蒸发并在恒温水浴锅中静置一段时间,得到碱水复水处理后的墨鱼干。

1.2.2.1 碱水复水处理的单因素实验 固定条件为:碱水浓度 0.50%、复水时间 2.0 h、复水温度 50 ℃,料液比 1:20 g/mL。考察碱水浓度(0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%)、复水时间(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h)、复水温度(20、30、40、50、60 ℃)以及料液比(1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 g/mL)对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响。

1.2.2.2 碱水复水处理的正交试验 参考单因素实验结果,设计正交试验,考察因素与单因素实验一致,以复水率和蛋白损失率为指标,碱水处理正交试验因素与水平见表 1。

表 1 碱水处理正交试验因素与水平  
Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment of alkaline solution treatment

水平	A碱水浓度 (%)	B时间 (h)	C温度 (℃)	D料液比 (g/mL)
1	0.25	1.5	40	1:10
2	0.50	2.0	50	1:20
3	0.75	2.5	60	1:30

1.2.3 纯水复水处理的优化 将墨鱼干在优化的碱水复水条件下进行处理后,取出,擦干表面的碱水,随后置于聚乙烯瓶中,加入蒸馏水,密封后在恒温水浴锅中静置一段时间,得到碱水-纯水组合复水处理后的墨鱼干。

1.2.3.1 纯水复水处理的单因素实验 固定条件为:复水时间 1.0 h、复水温度 50 ℃、料液比 1:20 g/mL。考察复水时间(0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h)、复水温度(20、30、40、50、60 ℃)以及料液比(1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 g/mL)对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响。

1.2.3.2 纯水复水处理的正交试验 参考单因素实验结果,设计正交试验,考察因素与单因素实验一致,以复水率和蛋白损失率为指标,纯水处理正交试验因素与水平见表 2。

### 1.2.4 墨鱼干复水率和蛋白损失率的测定

1.2.4.1 复水率的测定 复水率表示复水前后水分

表 2 纯水处理正交试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment of pure water treatment

水平	A时间(h)	B温度(°C)	C料液比(g/mL)
1	0.5	40	1:10
2	1.0	50	1:20
3	1.5	60	1:30

含量增加的比率<sup>[4]</sup>,即:

$$\text{复水率}(\%) = \frac{R_w}{D_w} \times 100$$

式中:  $D_w$  和  $R_w$  分别为复水处理前后墨鱼干的水分含量,用《GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法测定。

1.2.4.2 蛋白损失率的测定 根据文献 [10] 的方法稍作修改,墨鱼干在复水后,用双缩脲法测定复水液中的蛋白质的浓度,以牛血清白蛋白(BSA)为标准品制作标准曲线,取 1 mL 复水液,加入 4 mL 双缩脲试剂,混合,静置 0.5 h,于 540 nm 处测定吸光度。

$$\text{蛋白损失率}(\%) = \frac{C \times V}{1000 \times m \times a} \times 100$$

式中:  $C$  为复水液中的蛋白质浓度, mg/mL;  $V$  为复水液体积, mL;  $m$  为墨鱼干质量, g;  $a$  为墨鱼干复水前的总蛋白含量, %,用《GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法测定; 1000 为单位转化系数。

### 1.2.5 墨鱼干结构特性的测定

1.2.5.1 质构特性 将复水前以及最佳条件下复水的墨鱼干用剪刀和手术刀修剪至 1.5 cm×1.5 cm×0.3 cm 大小。TPA 测试条件:参考姜启兴<sup>[11]</sup>的方法,并略有修改。使用 P/5 平底柱形探头,测试前速率 3 mm/s,测试速率 1 mm/s,测试后速率 1 mm/s,压缩程度为 50%,间隔时间为 5 s,触发力为 5 g,每组处理样品测 5 组平行。

1.2.5.2 墨鱼干肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)的提取 参考文献 [12] 的方法。将复水前以及最佳条件下复水的墨鱼干肌肉剪碎,各取 4.0 g,加入 25 mL 预冷缓冲液 A(0.1 mol/L NaCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH7.5),以 8000 r/min 均质 30 s,重复 2 次后离心(10000 r/min, 10 min, 4 °C),取沉淀加入 15 mL 的缓冲液 A,混合均匀后,继续离心(10000 r/min, 10 min, 4 °C),重复 2 次,弃去上清液,所得沉淀加入 4 mL 的缓冲液 B(0.6 mol/L NaCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH7.5), 4 °C 下浸提 2 h 以上,离心(10000 r/min, 10 min, 4 °C)后的滤液即为 MP 溶液。用双缩脲法测定蛋白质浓度,方法同 1.2.4.2, MP 溶液根据实验要求调整合适的浓度。

1.2.5.3 MP 二级结构的测定 将提取出的 MP 溶液冻干成蛋白粉末,取一定量的样品粉末用傅里叶变换红外光谱仪在 4000~600 cm<sup>-1</sup> 范围内扫描 8 次。用

PeakFit 软件提取 1700~1600 cm<sup>-1</sup> 区域的谱图进行二阶导数峰值拟合以获得 MP 二级结构的信息<sup>[13]</sup>。

1.2.5.4 肌原纤维碎片化指数(Myofibrillar Fragmentation Index, MFI)的测定 用缓冲液 B 将 MP 的浓度调整至 0.5 mg/mL,在 540 nm<sup>[14]</sup> 下测定吸光度  $A_{540 \text{ nm}}$ 。

$$\text{MFI} = 200 \times A_{540 \text{ nm}}$$

1.2.5.5 组织结构观察 通过苏木精-伊红(Hematoxylin and Eosin, H&E)染色法观察复水前以及最佳条件下复水的墨鱼干的组织结构。在 Liang 等<sup>[15]</sup> 的方法上稍作改进,样本用 4% 多聚甲醛固定 24 h 后,用乙醇梯度脱水、二甲苯透明、石蜡包埋,随后用石蜡切片机将其切成 5 μm 厚的薄片,经展开、烤片后,进行 H&E 染色,最后用中性树胶封固,于光学显微镜下放大 40 倍观察。

## 1.3 数据处理

采用 SPSS 25 进行数据分析,实验结果以“平均值±标准差”表示;用 Duncan 多重检验法比较各实验组之间的差异, $P < 0.05$  即认为有显著差异;用一般线性模型单变量分析法对正交实验的结果进行方差分析。图采用 Origin 2021 绘制。每组实验均重复 3 次以上。

## 2 结果与分析

### 2.1 碱水复水处理的单因素及正交试验结果

#### 2.1.1 碱水复水处理的单因素实验结果

2.1.1.1 碱水浓度对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 碱水处理的单因素实验结果见图 1,随着碱水浓度从 0.25% 提高至 0.50%,墨鱼干的复水率显著上升( $P < 0.05$ ),其在 0.50% 时达到最大,为 245.5%±4.0%,而进一步提升碱浓度以后复水率无显著差异,说明碱水处理下,0.50% 的碱浓度可使墨鱼干的复水率达到阶段性的饱和,这主要归因于蛋白质在碱性介质中往往带负电荷,其中的带电基团发生静电排斥的作用,进而打开变性肌原纤维蛋白的网络结构<sup>[16]</sup>。碱水浓度对蛋白损失率的变化与复水率具有一致性,这主要归因于碱水的作用下,蛋白质的溶解度升高,使部分组织中的蛋白质溶解在水中<sup>[17]</sup>。

因此选取碱水浓度为 0.25%、0.50%、0.75% 作为正交试验中的优化水平。

2.1.1.2 碱水处理时间对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 在碱水复水的前 0.5~2.0 h,墨鱼干的复水率呈现上升的趋势,在 2.0 h 时,复水率达到最高,随后复水率无显著差异,说明碱水处理下,2.0 h 的处理时间可使墨鱼干的复水率达到阶段性的饱和,这主要归因于墨鱼干与复水液之间的水势差导致水分进入墨鱼干的组织<sup>[18]</sup>。蛋白损失率在 1.5 h 前不断上升,随后趋于平稳,说明碱水处理时间过长将导致墨鱼干的组织严重分解,这可能是由于碱水使部分带负

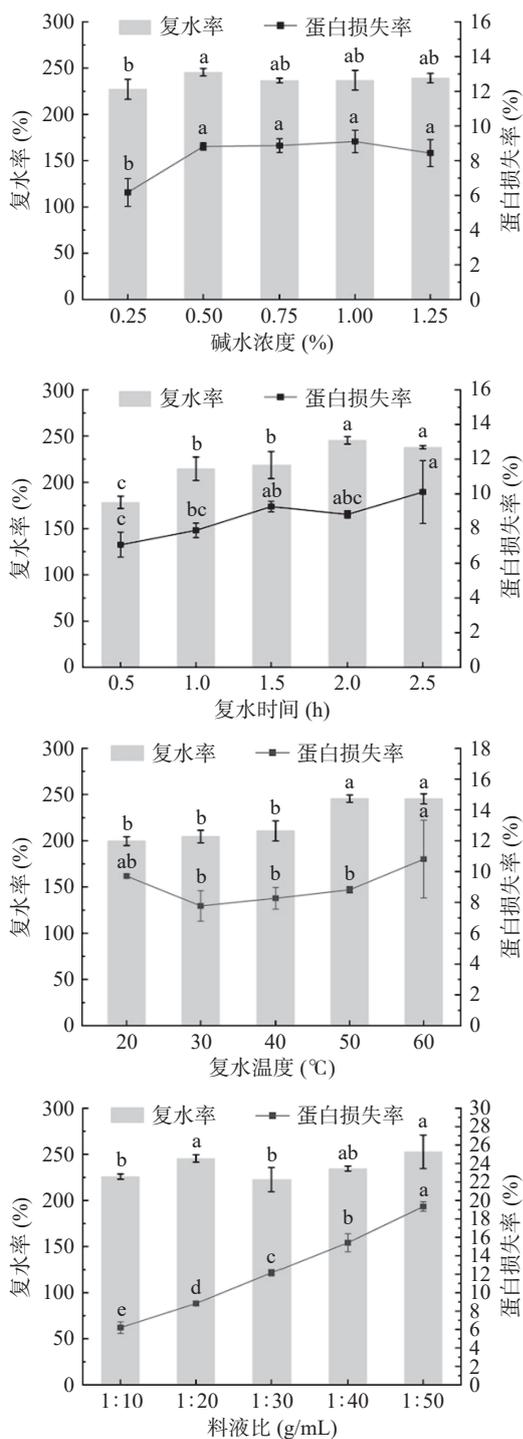


图1 碱水处理单因素实验结果

Fig.1 Single factor experiment results of alkaline solution treatment

注: 不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ); 图2、图5同。

电荷的蛋白质发生溶胀并逐渐进入复水液中。

根据复水率和蛋白损失率的变化趋势, 选取碱水处理时间为 1.5、2.0、2.5 h 作为正交试验中的优化水平。

2.1.1.3 碱水处理温度对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 随着碱水温度升高, 墨鱼干的复水率逐渐升高, 其在 50 °C 时达到最高, 且温度进一步升高复水率无显著差异, 说明碱水处理下, 50 °C 的处理温度可使墨鱼干的复水率达到阶段性的饱和, 这主要是

因为温度升高导致分子运动速率加快<sup>[19]</sup>, 促进水分渗透进入墨鱼干的组织内部。蛋白损失率随碱水温度的变化较缓慢, 在 60 °C 时显著上升至 10.81%±2.52% ( $P<0.05$ ), 说明碱水处理温度升高引起水解作用加剧, 造成肌肉组织结构的破坏, 从而使组织中的蛋白质进入复水液中。

因此选取温度为 40、50、60 °C 作为正交试验中的优化水平。

2.1.1.4 碱水处理料液比对墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 随着料液比从 1:10 g/mL 上升至 1:20 g/mL 时, 复水率显著上升( $P<0.05$ ), 随后复水率不再显著增加, 因此适当增加料液比可增加复水率。而分析蛋白损失率发现, 料液比从 1:10 g/mL 逐渐提升至 1:50 g/mL 时, 蛋白损失率从 6.21%±0.63% 显著提升至 19.34%±0.52% ( $P<0.05$ ), 说明料液比升高将增加蛋白溶出。这可能是由于料液比增加, 墨鱼干中的蛋白质浓度与复水液中的蛋白质浓度相差增加, 从而更容易溶出<sup>[20]</sup>。

由于复水率在 1:20 g/mL 时相对达到较高的值, 因此选取料液比为 1:10、1:20、1:30 g/mL 作为正交试验中的优化水平。

2.1.2 碱水复水处理的正交试验结果 通过正交表(表3)中的 R 值以及表4方差分析的结果得出4个因素对复水率的影响大小次序为时间>温度>碱水浓度>料液比, 因素 B 和 C 均具有极显著影响( $P<0.01$ ); 因素 A 及因素 D 均没有显著影响。而4个因素对蛋白损失率的影响大小次序为料液比>温度>时间>碱水浓度, 且因素 B 具有显著影响( $P<0.05$ ); 因素 C 和 D 均具有极显著影响( $P<0.01$ ); 而因素 A 没有显著影响。

用综合平衡法选取最佳的条件<sup>[21]</sup>。分析正交表

表3 碱水处理正交试验结果

Table 3 Orthogonal experiment results of alkaline solution treatment

试验号	A碱水浓度	B时间	C温度	D料液比	复水率 (%)	蛋白损失率 (%)
1	1	1	1	1	206.1±10.1	5.47±0.13
2	1	2	2	2	232.0±6.5	10.04±0.41
3	1	3	3	3	249.6±6.9	18.07±1.76
4	2	1	2	3	223.9±2.9	13.21±1.07
5	2	2	3	1	240.5±3.6	9.45±2.37
6	2	3	1	2	240.2±5.6	9.01±0.15
7	3	1	3	2	229.2±11.6	11.08±0.69
8	3	2	1	3	226.2±12.4	12.96±0.83
9	3	3	2	1	247.6±6.9	9.72±2.98
K <sub>1j</sub>	229.2	219.7	224.1	231.4		
K <sub>2j</sub>	234.9	232.9	234.5	233.8		
K <sub>3j</sub>	234.3	245.8	239.8	233.2		复水率(%)
R <sub>j</sub>	5.7	26.1	15.7	2.4		
K <sub>1j</sub>	11.20	9.92	9.15	8.21		
K <sub>2j</sub>	10.55	10.82	10.99	10.04		
K <sub>3j</sub>	11.25	12.26	12.87	14.74		蛋白损失率(%)
R <sub>j</sub>	0.70	2.34	3.72	6.53		

表 4 碱水处理的方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis of the alkaline solution treatment

指标	误差来源	SS	df	MS	F	显著性
复水率	A	176.7	2	88.37	1.371	-
	B	3060	2	1530	23.75	**
	C	1140	2	570.3	8.849	**
	D	28.65	2	14.33	0.222	-
	误差	1160	18	64.45		
蛋白损失率	A	2.694	2	1.347	0.602	-
	B	25.20	2	12.60	5.631	*
	C	62.30	2	31.15	13.92	**
	D	204.5	2	102.2	45.69	**
	误差	40.28	18	2.238		

注:“-”表示无显著性,  $P>0.05$ ; “\*”表示有显著性,  $P<0.05$ ; “\*\*”表示有极显著性,  $P<0.01$ , 表6同。

中的 K 值发现, 对于两个指标而言均是 A<sub>2</sub> 最好, 故选 A<sub>2</sub>。B 和 C 因素增加将导致复水率和蛋白损失率显著增加, 因此需在两者之间取平衡, 故选 B<sub>2</sub> 和 C<sub>2</sub> 作为最佳条件。D 因素增加对复水率影响较小, 但会极大增加蛋白损失, 可选 D<sub>1</sub>, 然而本实验用于复水处理的聚乙烯瓶底面积较小, 其在 1:10 g/mL 的料液比下可正好浸没墨鱼干, 在实际生产时, 使用的容器往往具有更大的底面积, 可能会出现复水液不能完全浸没墨鱼干的情况, 因此将料液比适当放大, 故选 D<sub>2</sub> 作为最佳条件。

因此碱水处理墨鱼干的最佳工艺组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>D<sub>2</sub>, 条件为碱水浓度 0.50%、时间为 2.0 h、温度 50 °C、料液比为 1:20 g/mL。在此条件下, 复水率为 238.9%±7.7%, 蛋白损失率为 7.37%±0.17%。与正交试验中的每组结果进行对比, 此条件可保证在较高复水率的同时, 尽量减少蛋白的流失, 是理想的参数。

## 2.2 纯水复水处理的单因素及正交试验结果

### 2.2.1 纯水复水处理的单因素实验

2.2.1.1 纯水处理时间对碱水处理后墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 纯水处理的单因素实验结果见图 2, 随着纯水处理时间从 0.5 h 延长至 1.0 h, 墨鱼干的复水率呈现显著上升的趋势 ( $P<0.05$ ), 其在 1.0 h 时达到最大, 为 270.0%±7.2%, 而进一步延长纯水处理时间后复水率无显著差异, 说明 1.0 h 的纯水处理可使碱处理后的墨鱼干达到较高的复水率, 这主要归因于墨鱼干组织中残留的碱与纯水之间形成水势差从而促进水分进入墨鱼干的内部。而纯水处理时间延长, 蛋白损失率逐渐增加, 说明纯水处理时间过长可能导致细胞过度溶胀并使细胞膜破裂, 进而释放出组织中的内容物, 该现象与 Correia 等<sup>[22]</sup> 观察到的现象类似。

因此选取时间为 0.5、1.0、1.5 h 作为正交试验中的优化水平。

2.2.1.2 纯水处理温度对碱水处理后墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 随着纯水温度从 20 °C 上升

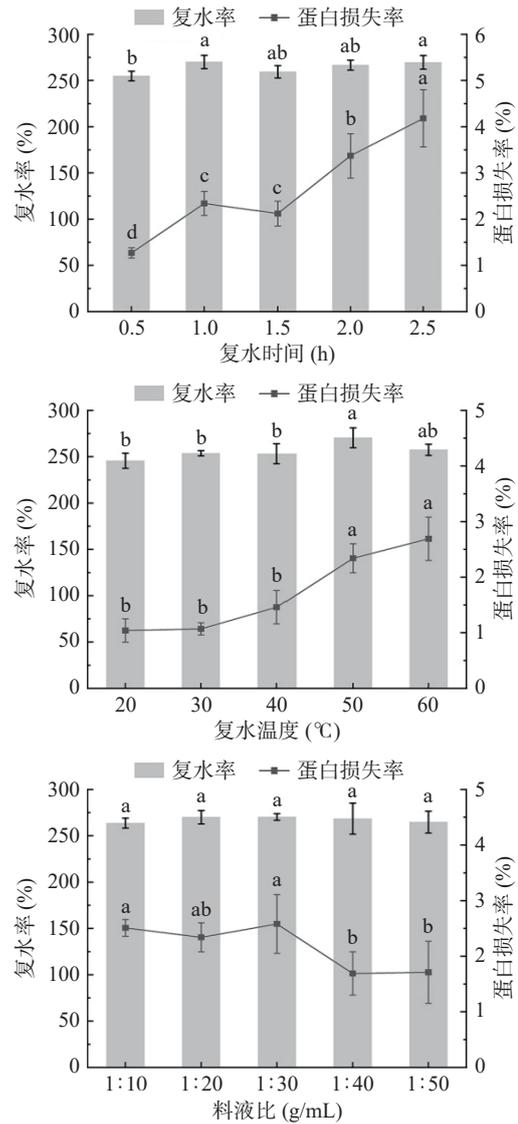


图 2 纯水处理单因素实验结果

Fig.2 Single factor experiment results of pure water treatment

到 60 °C, 复水率逐渐升高并在 50 °C 时达到最大, 而温度进一步升高至 60 °C 时, 复水率无显著差异, 说明 50 °C 的纯水处理可使碱处理后的墨鱼干达到较高的复水率。而蛋白损失率的变化则与复水率的变化一致, 该现象是因为温度升高, 分子扩散速度增加导致。

因此选取温度为 40、50、60 °C 作为正交试验中的优化水平。

2.2.1.3 纯水处理料液比对碱水处理后墨鱼干复水率和蛋白损失率的影响 随着料液比上升, 复水率无显著差异。蛋白损失率在 1:10~1:30 g/mL 范围内无显著差异, 并在 1:40 g/mL 以后显著下降 ( $P<0.05$ )。可能是因为随着料液比增加的同时, 复水液的黏度降低, 使蛋白质分子间的静电相互作用发生破坏, 从而溶解度下降<sup>[23]</sup>。

因此从复水效果及节约复水液的角度综合考虑, 选取料液比为 1:10、1:20、1:30 g/mL 作为正交试验中的优化水平。

2.2.2 纯水复水的正交试验 通过正交表中的 R 值进行直观分析得出 3 个因素对复水率的影响大小次序为时间>料液比>温度, 结果见表 5, 根据表 6 方差分析结果可知, 因素 A 具有显著影响( $P<0.05$ ); 而因素 B 和 C 均没有显著影响。而 3 个因素对蛋白损失率的影响大小次序为料液比>时间>温度, 且因素 A、B 和 C 均具有极显著影响( $P<0.01$ )。

表 5 纯水处理正交试验结果

Table 5 Orthogonal experiment results of pure water treatment

试验号	A时间	B温度	C料液比	空列	复水率 (%)	蛋白损失率 (%)
1	1	1	1	1	263.2±10.2	4.54±0.48
2	1	2	2	2	258.5±5.8	6.42±0.98
3	1	3	3	3	241.6±7.3	9.24±2.12
4	2	1	2	3	259.2±11.8	7.88±0.69
5	2	2	3	1	258.3±2.2	9.51±0.36
6	2	3	1	2	249.4±3.8	6.85±0.91
7	3	1	3	2	259.5±4.1	10.35±1.57
8	3	2	1	3	263.5±9.5	6.81±0.34
9	3	3	2	1	268.0±5.8	12.31±1.03
$K_{1j}$	254.4	260.7	258.7	263.2	复水率(%)	
$K_{2j}$	260.2	260.1	261.9	260.4		
$K_{3j}$	263.7	257.6	253.2	254.8		
$R_j$	9.3	3.1	8.7	8.4		
$K_{1j}$	6.73	7.59	6.06	8.79	蛋白损失率 (%)	
$K_{2j}$	8.08	7.58	8.87	7.87		
$K_{3j}$	9.82	9.47	9.70	7.97		
$R_j$	3.09	1.89	3.64	0.92		

表 6 纯水处理的方差分析结果

Table 6 Results of variance analysis of the pure water treatment

指标	误差来源	SS	df	MS	F	显著性
复水率	A	454.9	2	227.4	4.172	*
	B	327.9	2	163.9	3.007	-
	C	352.6	2	176.3	3.234	-
	空列	379.2	2	189.6	3.478	-
	误差	981.2	18	54.511		
蛋白损失率	A	43.27	2	21.64	18.10	**
	B	21.36	2	10.68	8.937	**
	C	65.24	2	32.62	27.30	**
	空列	4.524	2	2.262	1.893	-
	误差	21.51	18	1.195		

用综合平衡法选取最佳的条件。分析正交表中的 K 值发现, 对于两个指标而言, A 因素增加会同时增加复水率和蛋白损失率, 且均是具有显著影响的因素, 因此在两者之间取平衡, 选  $A_2$  作为最佳条件。而 B 和 C 因素变化使复水率变化较小, 但会极大地

表 7 复水前后墨鱼干质构特性的变化

Table 7 Changes in the texture properties of dried cuttlefish before and after rehydrating

复水步骤	硬度(g)	内聚性	弹性	胶着性(g)	咀嚼性(g)
复水前	4526.5±651.6 <sup>a</sup>	0.71±0.02 <sup>a</sup>	0.67±0.03 <sup>b</sup>	3219.8±524.1 <sup>a</sup>	2156.3±352.4 <sup>a</sup>
碱水处理后	1557.3±78.4 <sup>b</sup>	0.77±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.02 <sup>a</sup>	1202.2±86.6 <sup>b</sup>	1148.5±95.8 <sup>b</sup>
碱水-纯水处理后	775.8±63.4 <sup>c</sup>	0.71±0.06 <sup>a</sup>	0.96±0.02 <sup>a</sup>	548.6±76.8 <sup>c</sup>	524.7±72.4 <sup>c</sup>

注: 胶着性在数值上用硬度和内聚性的乘积表示; 咀嚼性在数值上用胶着性和弹性的乘积表示; 同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

改变蛋白损失率, 故根据正交试验结果, B 因素选  $B_2$ , C 因素选  $C_1$ , 但 1:10 g/mL 的料液比可能在实际生产时不能适用于所有容器, 因此将料液比适当放大, 故选  $C_2$ 。

故纯水处理的最佳工艺组合为  $A_2B_2C_2$ , 即时间为 1.0 h、温度 50 °C、料液比为 1:20 g/mL, 该条件下墨鱼干的复水率为 261.1%±7.1%, 蛋白损失率为 9.43%±0.57%。在两步处理下, 最终墨鱼干的复水率为 261.1%±7.1%, 蛋白损失率为 16.80%±0.74%(与第一步碱水处理的蛋白损失率 7.37%±0.17% 叠加), 与正交试验中的每组结果进行对比, 此条件可在复水率、蛋白损失率以及实际操作的可行性之间取得平衡。

### 2.3 复水前后墨鱼干结构特性的变化

2.3.1 墨鱼干复水前后的质构特性 由表 7 可知, 随着复水处理的进行, 墨鱼干的硬度、胶着性和咀嚼性显著下降, 而弹性显著上升( $P<0.05$ ), 内聚性无显著变化, 一方面是因为复水处理使水分逐渐进入墨鱼干的组织, 填充细胞间隙, 起到软化组织的效果, 另一方面, 温度和碱的作用使变性胶原蛋白的结构更松散<sup>[24]</sup>, 一定程度上降低了组织的硬度。胶着性和咀嚼性是指口腔将食品咀嚼到可吞咽时的稳定状态需做功的大小<sup>[25]</sup>, 墨鱼干的胶着性和咀嚼性随着复水过程的进行而不断降低, 这主要归因于复水处理使墨鱼干的硬度逐渐降低, 导致咀嚼所需的能量减少。因此碱水-纯水的组合复水处理可降低墨鱼干的硬度且更易咀嚼。

2.3.2 MP 的二级结构 如图 3 所示, 墨鱼干 MP 的红外特征峰在复水前后发生了较大的变化, 其在 3283  $cm^{-1}$  处羟基的伸缩振动峰消失, 并在 3190  $cm^{-1}$

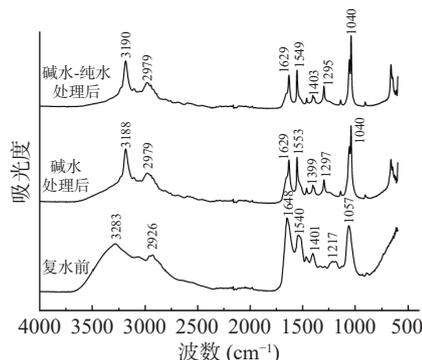


图 3 复水前后墨鱼干 MP 红外光谱图的变化

Fig.3 Changes in the Fourier transform infrared spectroscopy of MP of dried cuttlefish before and after rehydrating

左右出现二级胺 N-H 的伸缩振动峰。这表明在碱水处理下, MP 分子中具有酸性的羟基被碱中和, 其氢原子被钠离子取代, 因此 O-H 键消失。

对 MP 二级结构进行分析发现, 碱水处理后, 墨鱼干 MP 的  $\alpha$ -螺旋相对含量从  $30.38\% \pm 2.95\%$  下降至  $20.37\% \pm 6.53\%$ ,  $\beta$ -折叠相对含量从  $34.93\% \pm 4.44\%$  上升至  $45.95\% \pm 2.48\%$ ,  $\beta$ -转角和无规卷曲的相对含量几乎不变, 结果见图 4, 说明碱和热处理导致蛋白质分子中的氢键断裂, 削弱维持  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠结构的氢键作用<sup>[26]</sup>。

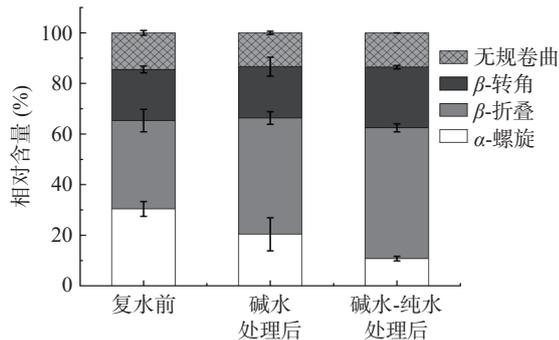


图 4 复水前后墨鱼干 MP 二级结构的变化

Fig.4 Changes in the secondary structure of MP of dried cuttlefish before and after rehydrating

而碱水-纯水处理后,  $\alpha$ -螺旋相对含量进一步下降至  $10.73\% \pm 0.91\%$ ,  $\beta$ -折叠的相对含量继续上升至  $51.70\% \pm 1.58\%$ , 且  $\beta$ -转角的相对含量也随之上升至  $24.02\% \pm 0.71\%$ , 可能是因为复水处理时间较长, 组织继续溶胀, 导致相邻肽链之间的肽键相互交替并形成许多分子间氢键<sup>[27]</sup>。

总体来看, 复水处理使墨鱼干 MP 的空间结构从  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠和  $\beta$ -转角转化, 形成不稳定的二级结构, 导致其立体结构折叠, 最终导致质构特性发生显著变化。

**2.3.3 肌原纤维碎片化指数 (MFI)** MFI 是反映 MP 完整度的重要指标, 其值与 MP 骨架蛋白的降解程度呈正相关<sup>[28]</sup>。如图 5 所示, 经碱水和碱水-纯水处理后, MFI 由复水前的 ( $9.87 \pm 0.23$ ) 显著上升至 ( $11.41 \pm 0.20$ ) 和 ( $11.67 \pm 0.31$ ) ( $P < 0.05$ ), 该现象与碱

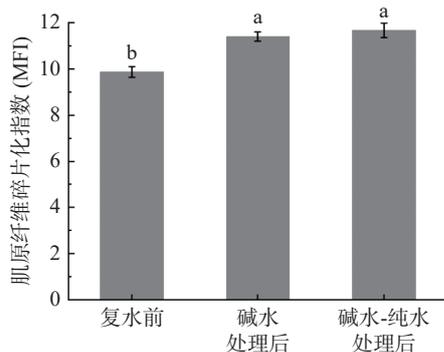


图 5 复水前后墨鱼干 MFI 的变化

Fig.5 Changes in the MFI of dried cuttlefish before and after rehydrating

产生的水解作用有关<sup>[29]</sup>。此外, 墨鱼组织中的内源酶也是引起 MFI 显著升高的因素, 汪岳刚<sup>[30]</sup>的研究发现, 鱿鱼片经远红外辅助热泵干燥后, 其中的内源性蛋白酶 B 和 L 依然具有活性。

**2.3.4 组织结构观察** 图 6 展示了墨鱼干的外套膜在复水前后的横向剖面 H&E 染色图。复水前的墨鱼干肌肉纤维紧密相连, 纤维间的间隙很小。碱水处理后观察到墨鱼干组织间隙增加并形成小碎片, 且组织的边界模糊, 呈随机排列。说明碱水处理不仅使水分渗透进入墨鱼干的组织, 也使组织中的肌原纤维发生部分水解, 并溶出肌纤维中间的肌浆蛋白和结缔组织, 形成柔软和糊状的质地, 与 Benjakul 等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。而碱水-纯水处理后, 墨鱼干的组织间隙进一步增大, 且边界清晰, 说明水分再次渗透进入墨鱼干组织中, 并导致部分被碱分解的蛋白质离开组织, 使肌原纤维与水分充分接触。

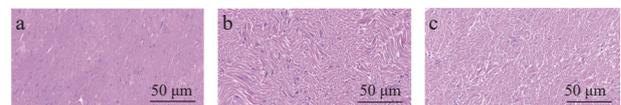


图 6 复水前后墨鱼干组织的 H&E 染色图 (40 $\times$ )

Fig.6 H&E staining micrographs of dried cuttlefish mantle before and after rehydrating (40 $\times$ )

注: a: 复水前; b: 碱水处理后; c: 碱水-纯水处理后。

组织形态的变化与质构以及 MFI 的变化趋势相符合, 说明碱水与纯水组合处理可部分水解因干燥形成的变性蛋白而疏松其结构, 从而促进墨鱼干的复水过程, 并改善其质构。

### 3 结论

本文以墨鱼干为原料, 通过先用碱水, 后用纯水的两步法复水处理, 经单因素及正交试验优化后得到墨鱼干的最佳复水条件, 使墨鱼干在复水程度和组织的分解上取得平衡。在最佳的复水条件下分析复水过程中墨鱼干的质构特性, 其硬度、胶着性和咀嚼性均逐渐降低, 而弹性则逐渐上升, MP 的二级结构进一步折叠。微观结构表明, 随着复水过程的进行, 墨鱼干组织的间隙不断增加且肌原纤维发生断裂。因此本研究为墨鱼干的复水条件提供了合理科学的实验依据, 对指导墨鱼干复水处理的进行及探究其复水后品质的变化具有重要意义。此外, 为进一步提高墨鱼干的食用品质, 后续可将复水后的墨鱼干进行熟制并分析其品质特性, 从而为墨鱼干的加工利用提供更加充分的依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

[1] THANONKAEW A, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Chemical composition and thermal property of cuttlefish (*Sepia*

- pharaonis*) muscle[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19: 127–133.
- [2] 贾俊琦, 张悦, 廖月琴, 等. 2种乌贼肌肉的营养成分及品质评价[J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 234–243. [JIA Junqi, ZHANG Yue, LIAO Yueqin, et al. Evaluation of the nutritional composition and quality of muscles in two cuttlefish species[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 234–243.]
- [3] 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. 中国渔业统计年鉴: 2014–2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014–2023. [Fishery and Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquatic Technology Promotion Terminal, China Society of Fisheries. *Chinese Fishery Statistics Yearbook 2014–2023*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014–2023.]
- [4] 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*, 2012, 47: 300–307.
- [5] 王珊, 李洪军, 贺稚非, 等. Box-Behnken 响应面法优化鱿鱼复水工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(21): 254–258. [WANG Shan, LI Hongjun, HE Zhifei, et al. Box-Behnken design response surface methodology to optimize process of squid rehydration[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(21): 254–258.]
- [6] 王珊. 鱿鱼复水工艺条件及品质特性的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016. [WANG Shan. Research on process optimization and quality changes of rehydration squid[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.]
- [7] KUGINO M, KUGINO K, WU Z H. Rheological properties of dried squid mantle change on softening[J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(2): 321–324.
- [8] 王珊, 李洪军, 贺稚非, 等. 干鱿鱼 Peleg 复水模型的建立与复水品质特性[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 56–61. [WANG Shan, LI Hongjun, HE Zhifei, et al. Establishment of Peleg model and quality characteristics of rehydrated squid[J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 56–61.]
- [9] 陈洪. 碱发机理研究[J]. *食品科学*, 1988(10): 17–19. [CHEN Hong. Study on the mechanism of alkaline rehydration[J]. *Food Science*, 1988(10): 17–19.]
- [10] 刘柏华, 殷钟意, 郑旭煦, 等. 超声波对牡丹籽粕蛋白质碱提取工艺及氨基酸组成的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(9): 215–219. [LIU Bohua, YIN Zhongyi, ZHENG Xuxi, et al. Effect of ultrasound on alkali extraction and amino acid composition of peony seed meal protein[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(9): 215–219.]
- [11] 姜启兴. 鳙鱼肉热加工特性及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [JIANG Qixin. Study on thermal processing properties and mechanism of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) muscle[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [12] 邱泽慧, 郑尧, 王锡昌. 解冻方式对养殖暗纹东方鲀持水性及质构特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 56–63. [QIU Zehui, ZHENG Yao, WANG Xichang. Effects of thawing methods on water holding capacity and texture of frozen farmed *Takifugu obscurus*[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 56–63.]
- [13] YANG S N, ZHANG Q L, YANG H Y, et al. Progress in infrared spectroscopy as an efficient tool for predicting protein secondary structure[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206: 175–187.
- [14] ZHANG X W, ZHU L X, SONG L S, et al. Combined treatment of lactic acid-ultrasound-papain on yak meat and its tenderization mechanism[J]. *Meat Science*, 2023, 196: 43–53.
- [15] LIANG Y S, WU Y, LI J P, et al. Effects of ammonia toxicity on the histopathology, detoxification, oxidative stress, and immune response of the cuttlefish *Sepia pharaonis* and the mitigation of  $\gamma$ -aminobutyric acid[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 232: 256–263.
- [16] 陈玉茹, 杨静, 黄苏红, 等. 毛肚涨发工艺优化及其水分分布和组织结构变化研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 157–163, 169. [CHEN Yuru, YANG Jin, HUANG Suhong, et al. Optimization of process for rehydrated beef tripe and researches on changes of its water distribution and histology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 157–163, 169.]
- [17] 张品, 朱文秀, 余顺波, 等. 响应面优化紫苏饼粕蛋白提取工艺[J]. *食品工业*, 2022, 43(1): 38–42. [ZHANG Pin, ZHU Wenxiu, YU Shunbo, et al. Response surface optimization of protein extraction from perilla meal[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(1): 38–42.]
- [18] 陈云川. 碱发机理再探[J]. *食品科学*, 1990(5): 17–19. [CHEN Hongchuan. Further exploration of the mechanism of alkaline rehydration[J]. *Food Science*, 1990(5): 17–19.]
- [19] 刘春阳, 白金波, 杨尚青, 等. 枳椇子多糖的酸提取工艺优化及其理化性质与抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(9): 148–156. [LIU Chunyang, BAI Jinbo, YANG Shangqing, et al. Optimization of acid extraction process for polysaccharide from *Hovenia dulcis* seed and analysis of its antioxidant activity[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(9): 148–156.]
- [20] OLALERE O S, GAN C Y. Process optimisation of defatted wheat germ protein extraction in a novel alkaline-based deep eutectic solvent (DES) via Box-Behnken experimental design (BBD)[J]. *Food Chemistry*, 2023, 409: 224–232.
- [21] 张静, 马璇. 多指标综合平衡法-正交试验优化九蒸九晒地黄炮制工艺[J]. *中国药房*, 2016, 27(7): 962–965. [ZHANG Jing, MA Ying. Optimization of processing technology of nine steaming nine drying of *Rehmannia glutinosa* by multiple indexes comprehensive balance method-orthogonal test[J]. *China Pharmacy*, 2016, 27(7): 962–965.]
- [22] CORREIA H, SOARES C, MORAIS S, et al. Seaweeds rehydration and boiling: Impact on iodine, sodium, potassium, selenium, and total arsenic contents and health benefits for consumption[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 155: 112385.
- [23] HADIDI M, IBARZ A, POURAMIN S. Optimization of extraction and deamidation of edible protein from evening primrose (*Oenothera biennis* L.) oil processing by-products and its effect on structural and techno-functional properties[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 13–21.
- [24] JRIDI M, LASSOUED I, KAMMOUN A, et al. Screening of factors influencing the extraction of gelatin from the skin of cuttlefish using supersaturated design[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2015, 94: 525–535.
- [25] 张文振, 贺稚非, 简文素, 等. 川白獭兔生长过程中屠宰性能和肉品质特性变化[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–10[2024-03-27]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038691>. [ZHANG Wenzhen, HE Zhifei, JIAN Wensu, et al. Changes in slaughter performance and meat quality characteristics of Chuanbai rex rabbits during the growth process [J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 1–10[2024-03-27]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.038691>.]
- [26] 何珊, 王昱芬, 张硕, 等. 煮制压力和保压时间对鸡肉肌原纤维蛋白结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(10): 25–31.

- [ HE Shan, WANG Yusu, ZHANG Shuo, et al. Effect of cooking pressure and holding time on the structure of chicken myofibrillar protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 25-31. ]
- [ 27 ] 杨红, 郑晓珂. 生物化学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2016.01: 14-18. [ YANG Hong, ZHENG Xiaoke. Biochemistry [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2016.01: 14-18. ]
- [ 28 ] XU J H, CAO H J, ZHANG B, et al. The mechanistic effect of bromelain and papain on tenderization in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) muscle[J]. Food Research International, 2020, 131: 91-98.
- [ 29 ] 郝婉名, 祝超智, 赵改名, 等. 碳酸钠对牛肉嫩化效果及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(20): 157-163. [ HAO Wanming, ZHU Chaozhi, ZHAO Gaimin, et al. Effects of sodium carbonate on tenderization and quality of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(20): 157-163. ]
- [ 30 ] 汪岳刚. 鱿鱼片远红外辅助热泵干燥特性及其品质变化的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. [ WANG Yuegang. Changes in the characteristics and quality of squid fillets dried by far infrared radiation assisted heat pump[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. ]
- [ 31 ] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, TANAKA M, et al. Physicochemical and textural properties of dried squid as affected by alkaline treatments[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80: 2142-2148.