

丙二醛氧化对籽瓜种仁蛋白质结构及功能特性的影响

Effects of malondialdehyde oxidation on structure and functional properties of seeds-watermelon seed protein

高 瑾¹ Manonose Tariro-upenyu¹ 李志豪¹

GAO Jin¹ MANONOSE Tariro-upenyu¹ LI Zhi-hao¹

王 萍² 余雄伟³ 李述刚¹

WANG Ping² YU Xiong-wei³ LI Shu-gang¹

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北 武汉 430000; 2. 塔里木大学生命科学学院, 新疆 阿拉尔 843300; 3. 武汉旭东有限公司, 湖北 武汉 430000)

(1. School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430000, China;

2. Tarim University School of Life Sciences, Alaer, Xinjiang 843300, China;

3. Wuhan Xudong Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

摘要:以籽瓜种仁蛋白质为研究对象,采用圆二色光谱、质构等技术探讨脂质过氧化产物丙二醛(Malondialdehyde, MDA)对其结构和凝胶特性的影响。结果表明:随 MDA 浓度的升高,籽瓜种仁蛋白质表面疏水性由 10 229 下降至 2 459,二级结构中 β -折叠含量上升,无规则卷曲含量下降;MDA 氧化使籽瓜种仁蛋白质凝胶强度逐渐变差,持水性先减小后增大,持油性先增大后减小;当 MDA 浓度为 0.1 mmol/L 时,籽瓜种仁蛋白质持水性最小为 174.5%,持油性最大为 404.5%,适度氧化有利于籽瓜种仁蛋白质功能特性的开发应用。

关键词:籽瓜种仁;分离蛋白;蛋白质氧化;功能特性

Abstract: This study used seeds-watermelon seed protein as research object, and the effects of lipid per oxidation product, Malondialdehyde (MDA) on its structure and gelling properties were investigated by means of circular dichroism spectroscopy and texture analyzer etc. The results showed that the surface hydrophobicity of seeds-watermelon seed protein decreased from 10 229 to 2 459, and the β -sheet content in the secondary structure in-

creased, and the irregular curl content decreased; the oxidation of MDA made the gelling strength of seeds-watermelon seed protein gradually deteriorate, the water-holding capacity first decreased and then increased, and the oil-holding trend was opposite; when the concentration of MDA reached 0.1 mmol/L, the water-holding capacity of seeds-watermelon seed protein reached the minimum value of 174.5%, and the oil-holding capacity reached the maximum value of 404.5%. The study indicated that moderate oxidation was beneficial to functional properties of seeds-watermelon seed protein.

Keywords: seeds-watermelon seed; isolated protein; protein oxidation; functional characteristics

籽瓜(*Citrullus lanatus* var)俗称“打瓜”,是西瓜(*Citrullus lanatus*)的变种,为葫芦科西瓜属植物,其种子常被称为西瓜子或黑瓜子。籽瓜种仁中蛋白质含量为 36%~40%,其中必需氨基酸含量较为丰富,除赖氨酸外,其他几种必需氨基酸(如色氨酸、苯丙氨酸等)含量均符合或超过 FAO 推荐的比例^[1-2]。

丙二醛(Malondialdehyde, MDA)是一种活性醛类物质,能引起蛋白质、多糖、核酸等生命大分子的交联反应形成聚合物,同时可通过 MDA 含量了解脂质过氧化程度^[3]。籽瓜种仁在加工、储藏等过程中极易受到光、氧、热等影响而发生脂质过氧化,MDA 是油脂氧化过程中的一种重要的氧化产物,对其产品风味、营养等会产生较大

基金项目:国家农业部公益性行业专项(编号:201503142-08);校企合作重大项目(编号:2019-4201-13-000018, 2018-4201-13-001319)

作者简介:高瑾,女,湖北工业大学在读硕士研究生。

通信作者:李述刚(1979—),男,湖北工业大学教授,博士生导师,博士。E-mail:lishugang2010@163.com

收稿日期:2019-05-27

负面影响。籽瓜种子中油脂的含量为 45% 左右,亚油酸、棕榈酸及硬脂酸是其主要成分^[4]。籽瓜种仁蛋白质的研究主要集中在提取工艺、蛋白质组成及功能特性上^[5],而油脂氧化尤其是脂质氧化产物丙二醛对其蛋白质结构及功能性质的研究尚未见报道。

试验拟以籽瓜种仁蛋白质为研究对象,采用圆二色光谱、质构等技术揭示 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质的结构特性及功能特性的影响,为籽瓜种仁蛋白质产品在实际工业生产中的精加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

籽瓜种仁:产地新疆;

透析袋:8 000~14 000 Da,美国 Biosharp 公司;

1,1,3,3-四甲氧基丙烷(1,1,3,3-Tetramethoxypropane, TMP)、8-苯胺基-1-萘磺酸(8-Anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS):分析纯,美国 Sigma 公司。

1.1.2 仪器与设备

高速冷冻离心机:Micro 21R 型,美国 Thermo Fisher 公司;

傅里叶红外光谱仪:Nicoletis50 型,美国 Thermo Fisher 公司;

圆二色谱仪:J-1500 型,日本 JASCO 公司;

荧光分光光度计:F4600 型,日本日立公司;

电泳仪:DYY-8C 型,北京六一生物科技有限公司;

纳米粒度分析仪:Nano ZS 型,英国 Malvern 公司;

扫描电子显微镜:SU-8010 型,日本日立公司。

1.2 试验方法

1.2.1 籽瓜蛋白的制备 参照毛晓英^[6]的方法。

1.2.2 MDA 的制备 通过水解 1,1,3,3-四甲氧基丙烷(TMP)制备新鲜的 MDA 储备溶液^[7]。将 8.4 mL TMP 与 10.0 mL 5.0 mol/L HCl 和 31.6 mL 去离子水混合,40 °C 暗处摇晃 30 min,获得 MDA,用 6 mol/L NaOH 将溶液 pH 调至 7.4,储备溶液中 MDA 浓度通过吸光度在 267 nm 处估算,摩尔消光系数值为 31 500 L/(mol·cm)。

1.2.3 氧化籽瓜种仁蛋白质的制备 参照 Wu 等^[7]的方法,将一定量的 MDA 与籽瓜种仁蛋白质溶液(50 mg/mL)混合,MDA 终浓度梯度为 0.00,0.01,0.10,1.00,10.00,100.00 mmol/L,25 °C 密封避光条件下振荡 24 h,透析 24 h 后冷冻干燥,于 4 °C 贮存备用。

1.2.4 巯基和二硫键含量的测定 采用 DNTB 比色法^[8]。

1.2.5 表面疏水性的测定 采用 ANS 荧光探针法^[8]。

1.2.6 二级结构的测定 参照 Wu 等^[7]的方法,将籽瓜种仁蛋白质上清溶液稀释成终浓度为 50 μg/mL,利用

MOS-450 圆二色光谱仪进行检测。

1.2.7 傅里叶红外光谱分析 参考 Liu 等^[9]的方法。在室温、干燥环境下将 2 mg 氧化籽瓜种仁蛋白质样品与 200 mg KBr 研磨混合均匀后压片。扫描波数 400~4 000 cm⁻¹,分辨率 4 cm⁻¹,扫描次数 128 次。

1.2.8 聚丙烯酰胺凝胶电泳 参考 Laemmli^[10]的方法。将籽瓜种仁蛋白质样品溶于 0.01 mol/L pH 8.0 Tris-HCl 缓冲液,使样品最终浓度为 1.5 mg/mL,上样量 10 μL。电泳凝胶板 0.75 mm,初始电流 10 mA,样品进入分离胶后电流 25 mA。

1.2.9 粒径分布 参考 Huang 等^[8]的方法。

1.2.10 微观结构 参照张海华等^[11]的方法,取少量籽瓜种仁蛋白质样品过 100 目筛,采用扫描电子显微镜(SEM)进行观察。

1.2.11 持水性和持油性的测定 参考吴伟等^[12]的方法。

1.2.12 凝胶特性的检测 利用超纯水将氧化后的蛋白质配置成 90 mg/mL 蛋白溶液,根据前期预试验调整布丁制作配方:0.25 g 卡拉胶,0.09 g 蔗糖脂肪酸酯,0.125 g 果胶,4 g 奶粉,3.5 g 白砂糖,42.5 g 氧化籽瓜种仁蛋白质溶液。将制作的布丁产品 4 °C 下存放 12 h 后测其质构。测定模式为 TPA 模式^[13],探头型号 SMS/P36R,测前速率 5.00 mm/s,测试速率 1 mm/s,测后速率 1 mm/s,停留时间 10 s,下压形变 40%,触发力 5 g。

1.3 数据处理

试验结果表示为(平均值±标准偏差),采用 SPSS 17.0 分析软件对数据进行显著性分析,利用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 巯基和二硫键含量

由表 1 可知,随 MDA 浓度的增加,籽瓜种仁蛋白质总巯基含量下降,二硫键含量上升,可能是蛋白质氨基酸侧链在 MDA 作用下形成共价交联,导致巯基含量损失,二硫键数量及分布改变,与 Wu 等^[4]的研究结果类似。因此,MDA 氧化后的籽瓜种仁蛋白质结构发生变化。

2.2 表面疏水性

由图 1 可知,籽瓜种仁蛋白质表面疏水性随 MDA 终浓度的增大而减小($P < 0.05$),可能是蛋白质构象在 MDA 氧化作用下先展开后又重新组合,导致亲水基团增加,疏水基团减少或者是蛋白质聚集,掩埋疏水基团,使其含量下降。王丹丹等^[14]研究表明,核桃蛋白表面疏水性随氧化程度的加深逐渐降低。

2.3 圆二色光谱

由表 2 可知,氧化后的籽瓜种仁蛋白质的 α -螺旋含量减少, β -折叠含量上升, β -转角及无规则卷曲含量下降,蛋白质的二级结构主要由氨基酸的局部序列和分子间不

表 1 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质总巯基及二硫键含量的影响[†]

Table 1 Effects of MDA oxidation at different concentrations on the content of total sulfhydryl group and disulfide bond of seeds-watermelon seed protein

MDA 浓度/ (mmol · L ⁻¹)	总巯基/ (Cund · mg ⁻¹)	二硫键/ (Cund · mg ⁻¹)
0.00	48.02±0.73 ^d	18.56±0.37 ^a
0.01	46.06±0.50 ^c	19.55±0.25 ^b
0.10	44.57±1.06 ^b	20.29±0.53 ^c
1.00	43.20±0.94 ^b	20.98±0.47 ^c
10.00	41.18±0.24 ^b	21.98±0.45 ^c
100.00	39.70±0.18 ^a	22.73±0.39 ^d

† 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

表 2 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质二级结构的影响[†]

Table 2 Effects of MDA oxidation at different concentrations on secondary structure of seeds-watermelon seed protein

MDA 浓度/(mmol · L ⁻¹)	α-螺旋/%	β-折叠/%	β-转角/%	无规则卷曲/%
0.00	33.9±0.12 ^f	5.5±0.14 ^a	13.3±0.31 ^e	47.3±0.34 ^f
0.01	12.5±0.23 ^b	46.1±0.20 ^d	1.2±0.29 ^b	40.1±0.21 ^c
0.10	24.4±0.15 ^c	12.4±0.18 ^b	22.1±0.34 ^f	41.1±0.11 ^d
1.00	26.7±0.11 ^d	20.1±0.21 ^c	7.2±0.18 ^d	46.0±0.34 ^e
10.00	10.4±0.10 ^a	59.3±0.34 ^f	2.3±0.23 ^c	28.0±0.35 ^a
100.00	13.2±0.14 ^c	53.9±0.19 ^e	0.0±0.00 ^a	32.9±0.46 ^b

† 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

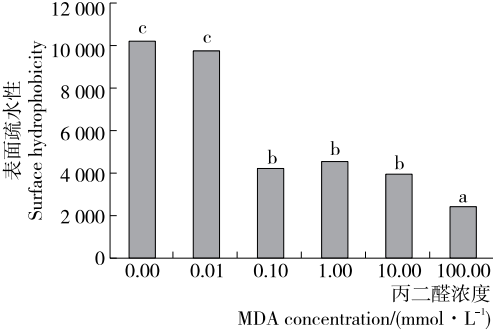
同部位的相互作用决定^[15],上述结果表明氧化会在一定程度上破坏籽瓜种仁蛋白质分子间的相互作用,进而改变二级结构。

2.4 傅里叶红外光谱

由图 2 可知,光谱归属峰为 1 500~1 700 cm⁻¹ 主要由籽瓜种仁蛋白质酰胺 I 带 C=O 伸缩振动引起,3 000~3 500 cm⁻¹处吸收峰主要由酰胺 I 带的 N—H 伸缩振动产生。蛋白质二级结构中酰胺 I 带红外光谱区域分配为:β-折叠 1 610~1 640 cm⁻¹,β-转角 1 660~1 670 cm⁻¹,α-螺旋 1 650~1 658 cm⁻¹,无规则卷曲 1 640~1 650 cm⁻¹,可反映出二级结构的敏感性^[16]。因此,氧化促使籽瓜种仁蛋白质的二级结构发生改变,进一步揭示了籽瓜种仁蛋白质结构中的氢键相互作用。

2.5 凝胶电泳

由图 3 可知,在非还原情况下,35~260 kDa 的条带浓度随 MDA 浓度的升高而增加;在 MDA 浓度为 100.00 mmol/L 时,高分子量聚集体在凝胶顶端发生积聚且逐渐加深,表明籽瓜种仁蛋白质受到氧化而产生聚集,且聚集程度随蛋白质氧化程度的加深而不断增加。Chen 等^[17]研究也发现,油脂氧化产物作用于大豆分离蛋



字母不同表示差异显著(P<0.05)

图 1 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质表面疏水性的影响

Figure 1 Effects of MDA oxidation at different concentrations on surface hydrophobicity of seeds-watermelon seed protein

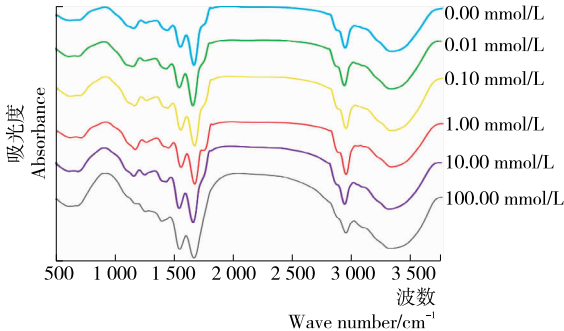


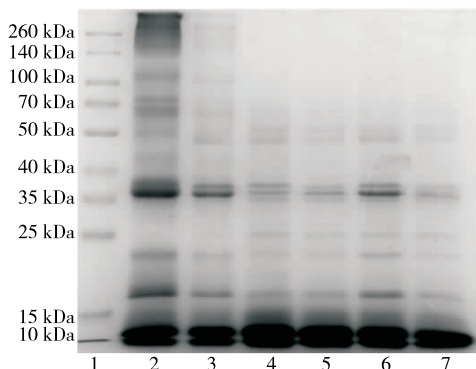
图 2 不同浓度 MDA 氧化籽瓜种仁蛋白质的傅里叶红外光谱分析

Figure 2 Fourier infrared spectrum analysis of seeds-watermelon seed protein oxidized by MDA at different concentrations

白可导致非二硫键诱导的聚集产生,并认为这种聚集是由非二硫键的共价键引起的。因此,籽瓜种仁蛋白质在氧化过程中,分子量的改变也会对其结构产生影响,进而改变蛋白质的功能特性。

2.6 粒径分布

由图 4 可知,MDA 氧化与天然的籽瓜种仁蛋白质粒



1. 蛋白 Marker 2~7. 分别为 100.00, 10.00, 1.00, 0.10, 0.01, 0.00 mmol/L MDA 氧化后的籽瓜种仁蛋白样品

图 3 经不同浓度 MDA 氧化后籽瓜种仁蛋白质凝胶电泳图

Figure 3 Protein gel electrophoresis of seeds-watermelon seed protein after MDA oxidation at different concentrations

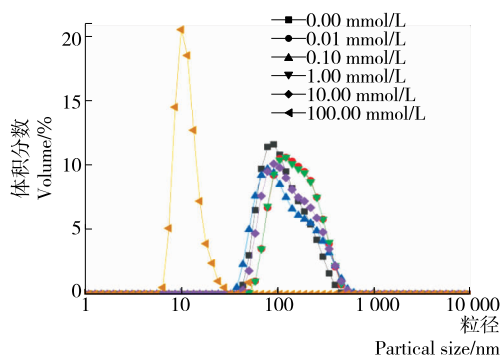


图 4 不同浓度 MDA 氧化籽瓜种仁蛋白粒径分析

Figure 4 Particle size analysis of seeds-watermelon seed protein oxidized by MDA at different concentrations

径均呈单峰分布, 峰值大多出现在 100.00 nm 左右; 当 MDA 浓度为 1.00 mmol/L 时, 粒径增大至 150 nm, 可能是低浓度氧化诱使籽瓜种仁蛋白质形成了氧化聚集体, 蛋白质粒径分布增大; 当 MDA 浓度为 100.00 mmol/L 时, 籽瓜种仁蛋白质溶液中一些较大的可溶性聚集体在共价和非共价键的直接相互作用下转变成不溶性组分, 小的可溶性聚集体断裂为更小的小分子多肽, 将氧化后的籽瓜种仁蛋白质溶液离心后, 其粒径减小。由此表明 MDA 氧化促使籽瓜种仁蛋白质发生聚集, 不可溶性蛋白质组分含量提高, 蛋白质溶解度降低。

2.7 微观结构

由图 5 可知, 未氧化的籽瓜种仁蛋白质显示出比较致密的结构, 氧化后的结构较为疏松, 且随 MDA 浓度的增大出现较多的颗粒状结构, 可能是籽瓜种仁蛋白质的高级结构在氧化后会去折叠, 分子间聚集, 从而使表面结构改变^[18]。

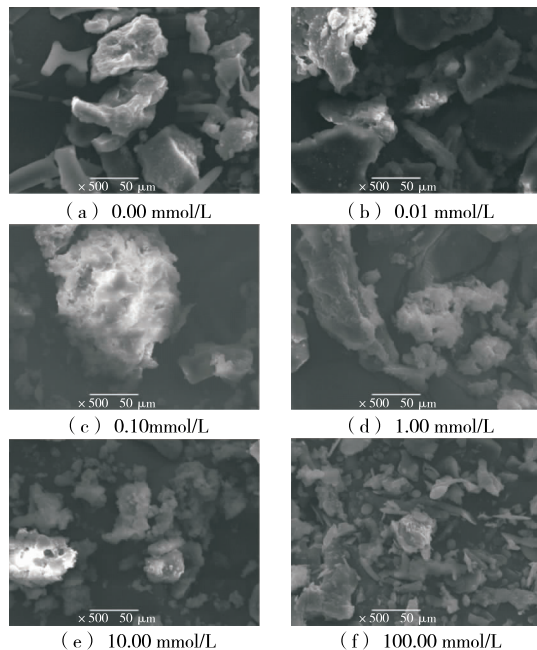
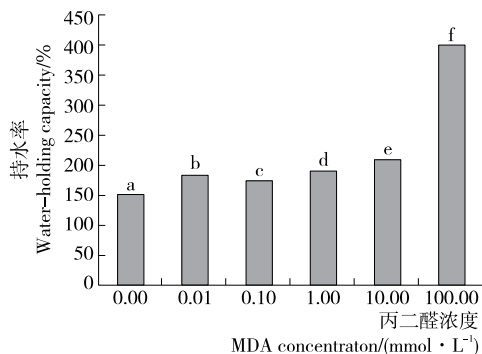


图 5 不同浓度 MDA 氧化籽瓜种仁蛋白质的微观结构

Figure 5 The microstructure of seeds-watermelon seed protein oxidized by MDA at different concentrations

2.8 持水性

由图 6 可知, 籽瓜种仁蛋白质的持水性随 MDA 浓度的增大先下降后上升, 但均高于天然籽瓜种仁蛋白质的。当 MDA 浓度较低时, 籽瓜种仁蛋白质表面氨基酸残基与 MDA 接触并反应, 使得籽瓜种仁蛋白质部分去折叠, 疏水基团外露, 持水性下降; 随着 MDA 浓度的增大, 籽瓜种仁蛋白质内部氨基酸残基被氧化修饰形成聚集体, 水分子进入球蛋白内部, 使持水性得到提高。故籽瓜种仁蛋白质在氧化后, 其结构发生改变, 而适度氧化有利于提高蛋白质的持水性, 为其生产加工及储藏方面提供理论支撑。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

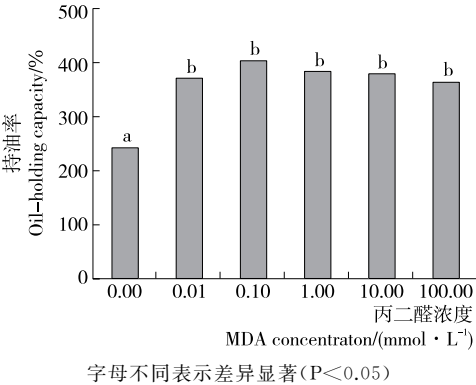
图 6 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质持水性的影响
Figure 6 Effects of MDA oxidation at different concentrations on water-holding capacity of seeds-watermelon seed protein

2.9 持油性

由图 7 可知,籽瓜种仁蛋白质持油性随 MDA 氧化程度的增加先上升后下降,在 MDA 浓度为 0.10 mmol/L 时达最大。Wu 等^[7]研究发现 MDA 可与大豆分离蛋白内部氨基酸残基接触、反应,暴露疏水基团。因而,不同浓度 MDA 氧化使得籽瓜种仁蛋白质对油脂的吸附能力增加,但当 MDA 浓度较高时,籽瓜种仁蛋白质在 MDA 的作用下共价交联度增加,与油脂结合能力下降,导致持油性略微降低。故 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质的持油性有一定的促进作用,可提高产品的风味品质。

2.10 凝胶特性的分析

由表 3 可知,籽瓜种仁蛋白质凝胶的硬度、咀嚼性随 MDA 浓度增大而减小,弹性在 MDA 浓度为 0.10 mmol/L 最好,恢复性变化不明显。这可能是籽瓜种仁蛋白质在加热条件下发生变性,其蛋白质结构展开并发生分子间



字母不同表示差异显著(P<0.05)
图 7 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质持油性的影响
Figure 7 Effects of MDA oxidation at different concentrations on oil-holding capacity of seeds-watermelon seed protein

表 3 不同浓度 MDA 氧化对籽瓜种仁蛋白质凝胶特性的影响[†]

Table 3 Effects of MDA oxidation at different concentrations on gelling properties of seeds-watermelon seed protein

MDA 浓度/(mmol · L ⁻¹)	硬度/g	弹性/mm	黏聚性/(g · s)	胶着性/mm	咀嚼性/mJ	恢复性/mJ
0.00	421.00±16.65 ^c	0.44±0.09 ^a	0.27±0.04 ^a	125.40±30.96 ^c	94.22±1.47 ^c	0.09±0.01 ^c
0.10	206.11±0.34 ^b	0.83±0.02 ^c	0.35±0.04 ^b	69.23±12.53 ^b	57.51±11.58 ^b	0.04±0.00 ^a
10.00	166.77±41.94 ^a	0.56±0.42 ^b	0.28±0.17 ^a	42.45±16.26 ^a	27.18±26.79 ^a	0.06±0.04 ^b

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

交联,进而聚集形成凝胶^[19]。因此,MDA 氧化可在一定程度上破坏籽瓜种仁蛋白质凝胶特性的形成,进而影响其生产应用。

3 结论

随着 MDA 浓度的升高,氧化程度加剧,籽瓜种仁蛋白质结构由无序变为有序,出现明显的聚集现象;MDA 氧化在一定程度上可提高籽瓜种仁蛋白质的持水性及持油性,而其凝胶特性逐渐被破坏,因此,不同浓度梯度 MDA 对籽瓜种仁蛋白质的凝胶特性会产生负面影响,进而影响其在凝胶加工过程中的应用。脂质过氧化反应较为复杂,代谢副产物较多,MDA 为主要次生产物之一,脂质过氧化对籽瓜种仁蛋白质的影响机理有待进一步探讨。

参考文献

[1] 陆晓婷,张超,张晖,等.黑籽瓜种子蛋白酶解工艺及抗氧化性研究[J].食品科技,2015,40(5):73-78.
[2] 薛文通,宋瑞霞,张泽俊.蜂蜜喷雾干燥后吸湿性的研究[J].食品科学,2004,25(1):59-62.
[3] WU Wei, LIN Qin-li, HUA Yu-fei, et al. Study on mechanism of soy protein oxidation induced by lipid peroxidation products[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2013, 5(1): 46-53.
[4] 邓芝串,张超,张晖,等.黑籽瓜种子蛋白质的功能特性[J].

食品工业科技,2014,35(10):115-124.
[5] 张超,郭晓飞,李武,等.籽瓜种子蛋白质组成及其提取工艺优化的研究[J].中国粮油学报,2013,28(9):119-123.
[6] 毛晓英.核桃蛋白质的结构表征及其制品的改性研究[D].无锡:江南大学,2012:17-46.
[7] WU Wei, HUA Yu-fei, LIN Qin-li. Effects of oxidative modification on thermal aggregation and gel properties of soy protein by malondialdehyde[J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2014, 51(3): 485-493.
[8] HUANG You-ru, HUA Yu-fei, QIU Ai-yong. Soybean protein aggregation induced by lipoxygenase catalyzed linoleic acid oxidation[J]. Food Research International, 2006, 39(2): 240-249.
[9] LIU Cheng-mei, ZHONG Jun-zhen, LIU Wei, et al. Relationship between functional properties and aggregation changes of whey protein induced by high pressure microfluidization[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(4): 341-347.
[10] LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. Nature, 1970, 227(5 259): 680-685.
[11] 张海华,朱科学,周惠明.超声波对小麦面筋蛋白结构的影响[J].中国农业科学,2010,43(22):4 687-4 693.
[12] 吴伟,蔡勇建,吴晓娟,等.丙二醛氧化对大米蛋白功能性的影响[J].食品工业科技,2015,36(18):113-122.

(下转第 151 页)

落总数值分别为7.9分,19.12 mg/100 g,5.23 lg (CFU/g)。而对照组鱼片的感官得分、TVB-N值及菌落总数值分别为5.4分,24.52 mg/100 g,6.25 lg (CFU/g),说明该复合保鲜剂具有较好的保鲜效果。

3 结论

壳聚糖、茶多酚、柠檬汁作为保鲜剂均对虹鲢鱼片具有保鲜效果,在单因素试验基础上,利用Box-Behnken响应面设计对筛选出的3种保鲜剂较优浓度进行组合优化确定最佳配比浓度为:1.75%壳聚糖,0.25%茶多酚,4.98%柠檬汁。通过验证实验表明复配保鲜剂对冷藏虹鲢鱼片具有良好的保鲜效果,可延缓贮藏期间鱼片的感官变化及鱼肉蛋白质等含氮物质的分解,同时对微生物的生长具有一定的抑制作用。

参考文献

- [1] 吴永俊,王玉涛,施文正,等.不同产地虹鲢鱼肉风味物质的比较[J].上海海洋大学学报,2017,26(6):889-899.
- [2] 王玉婷.复合生物保鲜剂在大黄鱼保鲜中的应用研究[D].济南:山东轻工业学院,2011:37-43.
- [3] QIU Xu-jian, CHEN Sheng-jun, LIU Guang-ming, et al. Inhibition of lipid oxidaxion in frozen farmed ovate pompano (*Trachinotus ovatus* L.) fillets stored at -18°C by chitosan cotaing incorporated with citric acid or licorice extract[J]. J Sci Food Agric, 2016, 96: 3 374-3 379.
- [4] 李双双.金枪鱼的保鲜技术研究[D].舟山:浙江海洋学院,2013:21-42.
- [5] LI Ting-ting, HU Wen-zhong, LI Jian-rong. Coating effects of

tea polyphenol and rosemary extract combined with chiosan on the storage quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. Food Control, 2012(25): 101-106.

- [6] 王当丰,李婷婷,国竞文,等.茶多酚-溶菌酶复合保鲜剂对白鲢鱼丸保鲜效果[J].食品科学,2017,38(7):224-229.
- [7] 沈秋霞,李明元,胡永正,等.包装方式对三文鱼片贮藏品质的影响[J].食品与机械,2018,34(6):133-138.
- [8] 李圣艳,李学英,靳春秋,等.保鲜剂对冰藏三文鱼品质变化的影响[J].河南农业科学,2017,46(4):128-133.
- [9] 汪之和.水产品加工与利用[M].北京:中国农业出版社,1999:21-25.
- [10] ZAHRA Ramezani, MEHDI Zarei, NEDA Raminnejad. Comparing the effectiveness of chitosan and nanochitosan coatings on the quality of refrigerated silver carp fillets[J]. Food Control, 2015(51): 43-48.
- [11] 刘琳.纳米壳聚糖安全性评价及其对南美白对虾涂膜保鲜的效果研究[D].杭州:浙江工商大学,2014:22-23.
- [12] 国际食品微生物规格委员会(ICMSF).微生物检验与食品安全控制[S].北京:中国轻工业出版社,2012:110-122.
- [13] 林静.茶多酚处理对微冻泥鳅保鲜效果的影响[D].重庆:西南大学,2017:19-22.
- [14] 吴圣彬,谢晶,苏辉,等.茶多酚对冻藏带鱼品质变化的影响[J].食品工业科技,2014,35(23):315-318,322.
- [15] 鞠健,汪超,李冬生,等.不同浓度的茶多酚对冷藏鲈鱼品质的影响[J].食品工业,2017,38(6):42-46.
- [16] SERAP Cosansu, SUHENDAN Mol, DIDEM Uçok Alakavu, et al. The Effect of lemon juice on shelf life of sous vide packaged whiting (*Merlangius merlangus euxinus*, Nordmann, 1840)[J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6: 283-289.

(上接第21页)

- [13] 刘施琳,朱丰,林圣楠.琼脂凝胶强度及弛豫特性的研究[J].食品工业科技,2017,38(13):85-100.
- [14] 王丹丹,毛晓英,孙领鸽,等.蛋白质氧化对核桃蛋白质结构的影响[J].食品工业科技,2018,39(12):32-38.
- [15] LIU Qian, LU Yan, HAN Jian-chun, et al. Structure-modification by moderate oxidation in hydroxyl radical-generating systems promote the emulsifying properties of soy protein isolate[J]. Food Structure, 2015(6): 21-28.
- [16] XIE Meng-xia, LIU Yuan. Studies on the Hydrogen bonding of aniline's derivatives by FT-IR [J]. Spectrochimica

Acta Part Amolecular and Biomolecular Spectroscopy, 2002, 58(13): 2 817-2 826.

- [17] CHEN Nan-nan, ZHAO Mou-ming, SUN Wei-zheng, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of soy protein isolate[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 26-32.
- [18] 赵润泽,蒋将,李进伟,等.烘烤对核桃蛋白二级结构、表面疏水性及乳化性的影响[J].食品工业科技,2016,37(16):157-166.
- [19] 尧思华.鸭血制各肉味风味物质的研究[D].南昌:南昌大学,2014:3-4.

(上接第33页)

- [17] JIANG Jiang, JING Wei-qin, XIONG You-ling, et al. Interfacial competitive adsorption of different amphipathicity emulsifiers and milk protein affect fat crystallization, physical properties, and morphology of frozen aerated emulsion [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 670-678.
- [18] STAMPFLI L, NERSTEN B. Emulsifiers in bread making[J].

Food Chemistry, 1995, 52(4): 353-360.

- [19] ALI T M, HASNAIN A. Effect of emulsifiers on complexation and functional properties of oxidized white sorghum (*Sorghum bicolor*) starch[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(1): 107-114.
- [20] BASEETH S S. Monoglyceride and emulsifier compositions and processes of producing the same; US, 20070009643 [P]. 2007-07-07.