

葡萄籽提取物纳米粒子/普鲁兰多糖涂膜 对三文鱼鱼片品质的影响

The effect of grape seed extract nanoparticles/pullulan coatings
on the quality of salmon fillets

郭雅娟¹ 范军刚² 李建珍¹

GUO Yajuan¹ FAN Jungang² LI Jianzhen¹

(1. 山西铁道职业技术学院轻工技术系, 山西 太原 030013;

2. 山西师范大学化学与材料科学学院, 山西 太原 030013)

(1. Department of Light Chemical Technology, Shanxi Railway Vocational and Technical College, Taiyuan, Shanxi 030013, China; 2. School of Chemistry and Materials Science, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi 030013, China)

摘要:目的:提高普鲁兰多糖(PUL)涂膜的保鲜性能,并制备具有缓释性能的保鲜材料。方法:以葡萄籽提取物(GSE)、壳聚糖、 γ -聚谷氨酸制备 GSE 纳米粒子,将不同质量的 GSE 纳米粒子加入到 PUL 涂膜液中,制备 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜,并评估 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜对三文鱼鱼片的保鲜性能。结果:与未处理鱼片相比,1.08% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜可降低鱼肉中的菌落总数,延缓脂肪氧化及蛋白质分解。此外,经 1.08% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后,蛋白质溶解度提高了 38.8%,超氧化物歧化酶活性升高了 4.02 U/mg、谷胱甘肽过氧化物酶活性提高了 0.20 U/g。结论:制备的 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜保鲜性能较好,可延长三文鱼鱼片货架期 5~7 d。

关键词:葡萄籽提取物纳米粒子;普鲁兰多糖;涂膜;三文鱼;鱼片;保鲜

Abstract: Objective: This study aimed to improve the preservation properties of pullulan (PUL) coating and prepare preservation materials with sustained-release properties.

Methods: GSE nanoparticles were prepared by grape seed extract (GSE), chitosan and γ -polyglutamic acid. GSE nanoparticles of different quality were added to the PUL coating solution to prepare GSE nanoparticles/PUL coatings. The preservation properties of GSE nanoparticles/PUL coatings on salmon fillets

were evaluated. **Results:** Compared with untreated fish fillets, the total number of bacteria in fish meat was reduced, and lipid oxidation and protein decomposition were delayed by 1.08% GSE nanoparticles/PUL coating. In addition, after fish fillets were treated with 1.08% GSE nanoparticles/PUR coating, the protein solubility was increased by 38.8%, and the activities of superoxide dismutase and glutathione peroxidase were increased by 4.02 U/mg and 0.20 U/g, respectively. **Conclusion:** The GSE nanoparticles/PUL coatings were prepared with good preservation properties, which can extend the shelf life of salmon fillets for 5~7 days.

Keywords: grape seed extract nanoparticles; pullulan; coating; salmon; fillet; preservation

三文鱼不仅口感较好,且含有较高的蛋白质及对人体健康有益的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA),深受人们喜爱。而脂肪易在酸性脂肪酶、中性脂肪酶和磷脂酶等的作用下,水解为脂肪酸和甘油,游离脂肪酸积累会出现不良气味;不饱和脂肪酸易在脂肪氧合酶的催化作用下发生加氧反应,生成氢过氧化物,氢过氧化物不稳定,易分解为小分子的醛、醇和酮等。微生物可利用蛋白质中的氮源促进自身的生长繁殖,此外,含氮物质被分解成小分子的氨和胺类化合物会造成鱼肉腐臭味增加^[1]。因此,三文鱼在远距离运输及贮藏过程中易变质。有研究^[2-3]显示,天然抗氧化类物质可延缓食品的腐败变质。

葡萄籽提取物(grape seed extract, GSE)是葡萄酒行业的副产品,由于含有大量原花青素,使其能够捕捉自由基,其抗氧化能力大约是维生素 E 的 20 倍,维生素 C

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(编号:2021L607)

作者简介:郭雅娟,女,山西铁道职业技术学院副教授,博士。

通信作者:范军刚(1977—),男,山西师范大学实验师,博士。

E-mail: Fjg1977SX@126.com

收稿日期:2023-02-18 改回日期:2023-08-27

的50倍^[4]。此外,GSE中存在的酚类化合物能够抑制病原菌和腐败菌的生长^[5-6]。然而,酚类化合物化学性质不稳定,易失去活性^[7-8]。

纳米粒子由于制备简单、负载率高而被广泛用于活性物质包埋。Baek等^[9]制备了海藻酸盐/GSE纳米颗粒基食用涂层,并将其应用于虾的保鲜。与未处理样品相比,纳米颗粒涂层可将虾的保质期延长5d以上。Bao等^[10]研究表明,与对照膜相比,用含有茶多酚纳米粒子的明胶膜包装的鱼油具有更低的过氧化值。

涂膜保鲜是指将成膜材料通过喷涂、浸渍等方式在食品或包装材料表面形成膜^[11]。壳聚糖(chitosan, CS)为天然的阳离子聚合物,具有优异的成膜性能和生物相容性^[3]。 γ -聚谷氨酸(γ -polyglutamic acid, γ -PGA)是天然阴离子聚合物,具有无毒无害、易降解等特点^[12]。普鲁兰多糖(pullulan, PUL)是一种水溶性中性多糖,由于其安全性高及可生物降解而被广泛应用^[2]。Li等^[2]研究显示,与未处理鱼片相比,经PUL/羧甲基纤维素钠/没食子酸/ ϵ -聚赖氨酸盐酸盐涂膜处理后,可延缓微生物和脂肪氧化,还可显著保持鱼肉中不易流动水含量和持水力。张盼等^[13]研究表明,CS/PUL膜可延缓牛肉品质劣变并延长货架期。但PUL无抗菌及抗氧化性能,需与保鲜剂结合使用。

目前,大多数研究主要集中在纳米粒子对膜的机械性能及抗氧化性能的影响^[14-15]。然而,有关活性纳米粒子涂膜对三文鱼鱼片鲜度指标的影响研究尚未见报道。此外,GSE对三文鱼鱼片中内源抗氧化酶活性是否有保护作用也尚未可知。研究拟制备GSE纳米粒子/PUL涂膜,以三文鱼鱼片为对象,研究GSE纳米粒子/PUL涂膜对三文鱼鱼片鲜度指标及内源抗氧化酶活性的影响,以期GSE纳米粒子/PUL涂膜在水产品中的应用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

三文鱼:市售;

CS:脱乙酰度 $\geq 95\%$,上海麦克林生化科技有限公司;

硫代巴比妥酸:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

γ -PGA(聚谷氨酸99%)、GSE(原花青素95%):西安全奥生物科技有限公司;

总超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶试剂盒:南京建成生物工程研究所;

蒸煮袋:15 cm \times 25 cm,双层20丝,东光县玉华塑料厂;

氧化镁、氢氧化钾、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

三氯乙酸:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

台式真空冷冻干燥机:FreeZone 2.5L型,美国LABCONCO公司;

冷冻高速离心机:MultifugeX1型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

全自动凯氏定氮仪:Kjeltec 8400型,丹麦FOSS公司;

紫外—可见分光光度计:UV-2550型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

千分之一电子分析天平:MS-105DU型,瑞士梅特勒托利多仪器有限公司;

集热式磁力加热搅拌器:DF-101S型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;

电位粒径纳米分析仪:Zetasizer Nano ZS型,英国Malvern公司;

场发射扫描电子显微镜:S-4800型,日本日立公司。

1.3 试验方法

1.3.1 GSE纳米粒子的制备 参考潘飞等^[16]的方法稍作修改。称取0.1g CS溶于体积分数为1%乙酸溶液中,制备质量浓度为1 mg/mL的CS溶液,磁力搅拌直至溶液澄清透明;称取0.1g γ -PGA溶于去离子水中,制备质量浓度为1 mg/mL的 γ -PGA溶液,取50 mL γ -PGA溶液,加入0.12 g GSE,搅拌均匀;在磁力搅拌下,将含有GSE的 γ -PGA溶液缓慢滴加到CS溶液中,继续搅拌30 min,8 000 $\times g$ 离心30 min,去除上清液冷冻干燥,制备出GSE纳米粒子。

1.3.2 纳米粒子表征

(1) 粒径测定:取一定量制备好的GSE纳米粒子溶液,采用粒度分析仪测定纳米粒平均粒径、PDI,基于633 nm波长在25 $^{\circ}$ C连续测定6次取平均值。

(2) SEM观察:将纳米粒子用双面胶固定,喷金处理3 min,采用场发射扫描电镜观(SEM)观察纳米粒子表面微观形貌。

1.3.3 GSE纳米粒子/PUL涂膜液的制备 通过浊度法测定其对腐败希瓦氏菌的最小抑菌浓度(MIC)为0.054 g/mL,因此,制备1MIC及2MIC的涂膜。称取1 g PUL加入到100 mL去离子水中,再加入15%(基于PUL质量)甘油,磁力搅拌直至溶液澄清透明,分别加入0.54, 1.08 g GSE纳米粒子,标记为0.54%,1.08% GSE纳米粒子/PUL涂膜液。并以不添加GSE纳米粒子制备PUL涂膜液。

1.3.4 三文鱼鱼片涂膜保鲜 将三文鱼去头、去皮、去骨后,取腹背部鱼肉,每片(210 \pm 10) g。将鱼片分别浸渍于涂膜液中,10 min后取出,风干(含水量约为55%)后放入已灭菌的蒸煮袋内,密封,置于(4 \pm 1) $^{\circ}$ C冰箱内。以浸渍于无菌水中的样品为对照组,于第0,3,6,9,12,15天测定鱼肉的鲜度指标。

1.3.5 三文鱼鱼片鲜度指标测定

(1) 感官评分:参考丁婷等^[17]的方法。从颜色、气味、质地和外观 4 个方面对鱼片进行评分,每项最高 10 分,40 分表示非常好,30 分表示中等好,20 分表示可接受下限,20 分以下不可接受。

(2) pH 值:参考杨华等^[18]的方法。

(3) 硫代巴比妥酸(TBA)值:参考杨丽丽等^[19]的方法。

(4) 菌落总数(TVC):按 GB 4789.2—2016 执行。

(5) 挥发性盐基氮(TVB-N)含量:按 GB 5009.228—2016 执行。

1.3.6 三文鱼鱼肉抗氧化酶的提取及活性测定

参考 Yang 等^[20]的方法提取内源抗氧化酶,参照试剂盒测定鱼肉总超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性。

1.3.7 三文鱼蛋白质溶解度的测定

参考 Yang 等^[20]的方法。

1.4 数据处理

所有指标均测定 3 个平行,结果以“平均值±标准偏差”表示。利用 Excel 2019 软件进行数据处理,采用 SPSS 26 软件进行相关性分析,采用 OriginPro 9.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 GSE 纳米粒子表征分析

2.1.1 粒径分析

试验制备的 GSE 纳米粒子平均粒径为(385.48±43.12) nm,PDI 为 0.31±0.03,表明所制备的 GSE 纳米粒子尺寸小,可较好地分散至溶液中。

2.1.2 SEM 分析

由图 1 可知,纳米粒子表面相对比较光滑,表明在 CS 与 γ -PGA 交联过程中,GSE 被包埋在内部。由于交联是动态的,大部分纳米粒子呈不规则形状,部分连接在一起。

2.2 感官评价

由图 2 可知,贮藏期间,各组鱼肉的感官评分有不同程度的下降。刚去皮的三文鱼鱼片为橙红色,鱼肉无异味,肌肉纹理整齐且弹性较高;贮藏后,鱼片颜色略白,鱼肉出现不同程度腐臭味,硬度和弹性均有所下降。与未

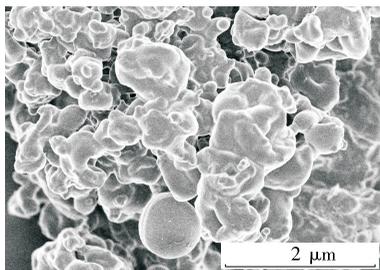


图 1 GSE 纳米粒子的 SEM 图片

Figure 1 SEM images of GSE nanoparticles

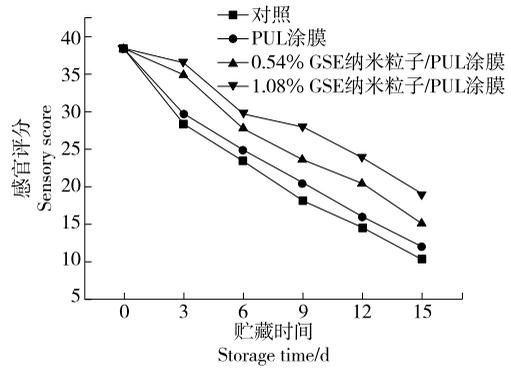


图 2 涂膜对三文鱼鱼片感官评分的影响

Figure 2 Effects of the coatings on sensory score of salmon fillets

处理的样品相比,经 PUL 涂膜处理后,感官评分稍有提高,可归因于 PUL 涂膜将鱼肉与空气隔开。而将 GSE 纳米粒子加入到 PUL 涂膜后,鱼片的气味、质地和外观进一步提高,且随着 GSE 纳米粒子量的提高,感官评分更高。这是由于 GSE 具有很强的抗氧化性能,可降低脂肪氧化产生的酸败味。此外,GSE 对腐败菌也有较强的抑制作用^[4-6]。

2.3 鲜度指标

2.3.1 TVC 值

腐败菌繁殖是导致鱼肉变质的主要因素,腐败菌利用完蛋白质后会产生腐臭味^[21]。由图 3(a)可知,新鲜鱼片的 TVC 值较低,为 3.92 lg(CFU/g)。随着时间的延长,鱼肉的 TVC 值逐渐增大,未处理样品的 TVC 值增长速度最快,第 8 天,其 TVC 值超过可接受限值[7 lg(CFU/g)]^[22]。经 PUL 涂膜处理后,第 10 天鱼肉的 TVC 值超过可接受限值。经 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后,货架期可延长至 13~15 d,表明 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜可延长鱼片货架期 5~7 d。经 PUL 涂膜处理后,微生物生长速度减慢,是由于鱼片表层的涂膜能控制 O₂ 和 CO₂ 的透过性,腐败菌在这种微气调环境中生长缓慢^[23]。经 0.54% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后,微生物生长速度明显降低,且呈剂量依赖。GSE 中的主要抗菌成分为原花青素,属于多酚类物质,其主要通过破坏细菌细胞膜的完整性和通透性以及抑制蛋白质的合成来达到杀灭微生物的目的^[24]。

2.3.2 pH 值

由图 3(b)可知,未经处理的鱼片 pH 值在第 3 天降至最低点,随后上升。经涂膜处理后,样品 pH 值下降速度减缓,加入 GSE 纳米粒子后,pH 值变化较小。贮藏后期,未经处理的样品 pH 值迅速上升。经 PUL 涂膜处理后,鱼肉 pH 值上升速度降低,经 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后,鱼肉 pH 值上升速度更低。这表明 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜能够有效抑制微生物的生长,减少含氮物质被分解为氨或胺类等碱性物质,进而降低 pH 值,与 TVC 值结果一致。

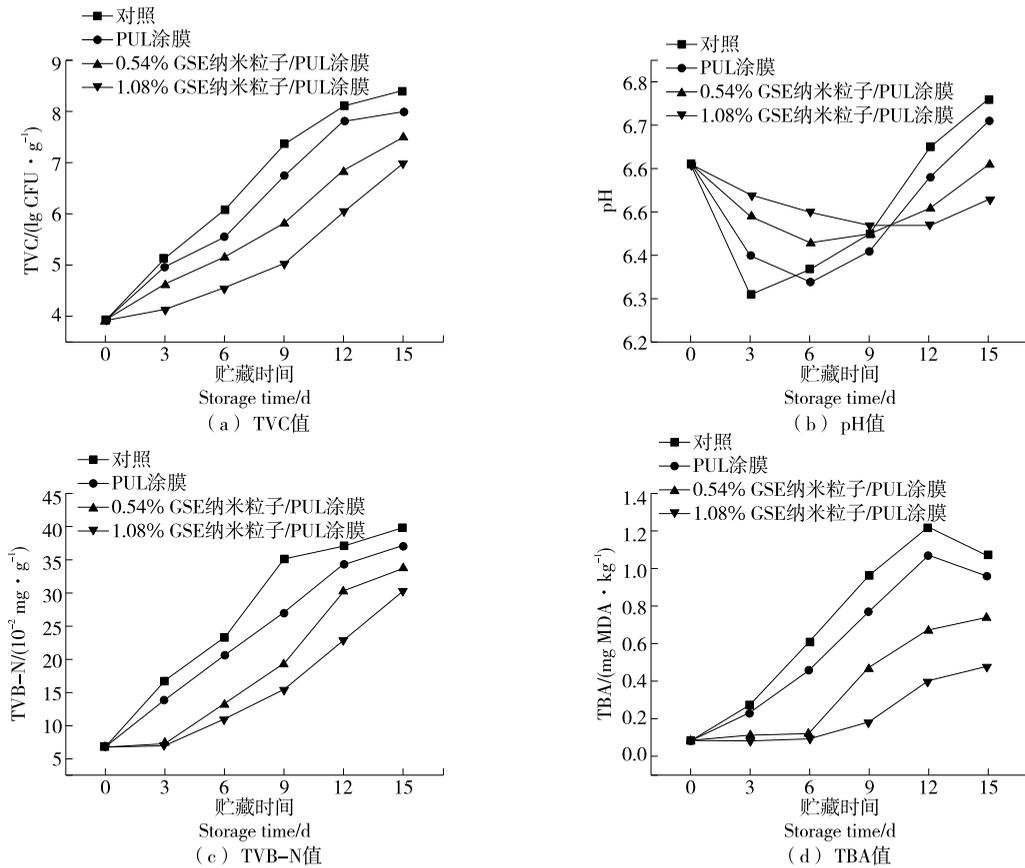


图3 涂膜对三文鱼鱼片鲜度指标的影响

Figure 3 Effects of the coatings on freshness index of salmon fillets

2.3.3 TVB-N 值 根据 GB/T 18108—2019, TVB-N ≤ 15 mg/100 g 为优级品, TVB-N 值为 15~30 mg/100 g 为合格品。由图 3(c)可知, 初始三文鱼鱼片的 TVB-N 值为 6.83 mg/100 g, 为优级品。贮藏期间, TVB-N 值随时间的延长而快速增大, 经涂膜处理后, 样品 TVB-N 值的增长速度降低。未经处理的鱼片, TVB-N 值在第 9 天超过 30 mg/100 g, 已不可食用。经 PUL 涂膜处理后, 鱼片的 TVB-N 值在第 10 天接近 30 mg/100 g, 可能是 PUL 形成的膜成为氧气的屏障, 能够延缓腐败菌生长繁殖, 进而减少 TVB-N 的生成^[2]。加入 GSE 纳米粒子后, 样品的 TVB-N 值上升速度降低, 且随着 GSE 纳米粒子量的增加而更低, 表明 GSE 可通过抑制腐败菌的生长, 减少蛋白质的分解, 进而降低鱼片的 TVB-N 值。Zhao 等^[25]用鱼胶和 GSE 涂层处理罗非鱼鱼片也可降低鱼肉中的 TVB-N 值。

2.3.4 TBA 值 对于脂肪含量较高的三文鱼来说, 可以将 TBA 限值定为 1~2 mg MDA/kg, 且对鱼肉的安全性无不利影响^[26]。由图 3(d)可知, 不同处理鱼片的 TBA 值均上升。整个贮藏期间, 经 PUL 涂膜处理后, 样品的 TBA 均低于未处理鱼片的。贮藏前期, 经 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后, 样品的 TBA 值几乎未升高; 贮藏后期, 样品

的 TBA 缓慢上升。一方面是由于涂膜能够隔绝氧气, 另一方面是 GSE 中的原花青素含有酚羟基可提供电子还原自由基, 中断脂肪的链式氧化。贮藏第 12 天, 未经处理及 PUL 涂膜处理的鱼片的 TBA 降低, 可能是由于生成的 MDA 与蛋白质、葡萄糖和其他成分发生反应所致^[26]。

2.4 抗氧化酶活性

SOD 和 GSH-Px 可将鱼体生成的自由基转化为无害物质, 超氧化物阴离子可被 SOD 还原为过氧化氢; 过氧化氢和脂肪氧化的次级产物在 GSH-Px 的作用下分解为水和脂肪酸, 进而使机体免受氧化损伤^[27]。由图 4 可知, 不同处理组的 SOD 和 GSH-Px 活性均显著降低。经 PUL 涂膜处理后, SOD 和 GSH-Px 活性与同期未处理的样品相比无差异, 表明 PUL 涂膜对 SOD 和 GSH-Px 均无保护作用。有研究^[20]显示, 亚麻籽胶/壳聚糖涂膜不能延缓 SOD 和 GSH-Px 活性降低。在 PUL 涂膜中加入 GSE 纳米粒子后, SOD 和 GSH-Px 活性下降速度减缓, 表明 GSE 可延缓 SOD 和 GSH-Px 活性下降。Yu 等^[28]研究表明, 用含有丁香精油、肉桂精油和柠檬草精油的 CS 涂膜可延缓草鱼鱼片中 SOD 和 GSH-Px 活性降低。随着 GSE 纳米粒子量的增加, SOD 和 GSH-Px 活性更高, 可能是 GSE 能够清除更多的自由基, 从而延缓酶失活。

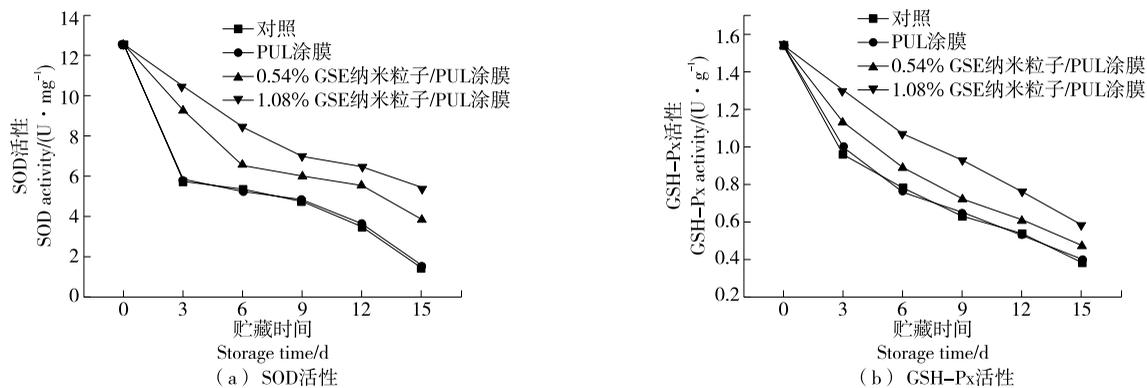


图 4 涂膜对三文鱼鱼片抗氧化酶活性的影响

Figure 4 Effects of the coatings on antioxidant enzyme activity of salmon fillets

2.5 蛋白质溶解度

由图 5 可知,蛋白质的溶解度随时间延长而降低,其中未经处理的样品的下降速度最快。经 PUL 涂膜处理后,溶解度下降速度稍有降低。经 GSE 纳米粒子/PUL 涂膜处理后,溶解度显著高于未处理样品的,表明 GSE 可延缓蛋白质的氧化。这是由于 GSE 的抗氧化性能较优,减少了蛋白质的氧化。此外,GSE 也可能通过抑制腐败菌的生长,提高蛋白质完整结构的程度,延缓巯基被氧化交联形成聚集体,从而提高蛋白质的溶解度^[29]。

2.6 TBA 值和蛋白质溶解度与抗氧化酶活性的相关性

由表 1 可知,TBA 值与 SOD、GSP-Px 活性呈负相关,溶解度与 SOD、GSP-Px 活性呈正相关,表明抗氧化物酶活性越高,TBA 值越低、蛋白质溶解度越高,即脂肪氧

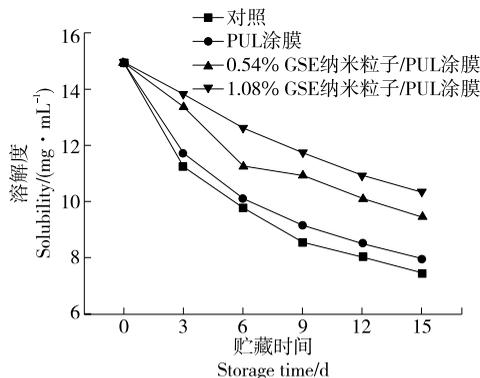


图 5 涂膜对三文鱼鱼片蛋白质溶解度的影响

Figure 5 Effects of the coatings on protein solubility of salmon fillets

表 1 TBA 值和蛋白质溶解度与抗氧化酶活性的相关性[†]

Table 1 Correlation analysis of TBA and protein solubility with antioxidant enzyme activity

指标	SOD		GSP-Px	
	相关性系数	P 值	相关性系数	P 值
对照组 TBA 值	-0.837 *	0.038	-0.912 *	0.011
PUL 涂膜组 TBA 值	-0.825 *	0.043	-0.909 *	0.012
0.54% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜组 TBA 值	-0.807	0.052	-0.864 *	0.026
1.08% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜组 TBA 值	-0.812 *	0.050	-0.883 *	0.020
对照组溶解度	0.969 **	0.001	0.997 **	0
PUL 涂膜组溶解度	0.965 **	0.002	0.998 **	0
0.54% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜组溶解度	0.991 **	0	0.990 **	0
1.08% GSE 纳米粒子/PUL 涂膜组溶解度	0.993 **	0	0.997 **	0

† * . $P < 0.05$; ** . $P < 0.01$.

化和蛋白质氧化程度越小。这可能是由于 GSE 延缓抗氧化物酶活性降低,而抗氧化物酶可清除一定的自由基。此外,pH 值对酶活性有一定影响,根据 pH 曲线推测 GSE 还可降低 pH 值波动延缓抗氧化物酶活性降低。

综上,GSE 纳米粒子/PUL 涂膜延缓鱼肉脂肪和蛋白质氧化可能是由于以下方面:在鱼肉表面的 PUL 涂膜

可阻隔部分氧气;GSE 在体外具有较强的自由基清除能力;GSE 可延缓抗氧化物酶活性降低。

3 结论

以葡萄籽提取物为活性物质、利用壳聚糖与 γ -聚谷氨酸之间的静电引力制备了葡萄籽提取物纳米粒子,将

葡萄籽提取物纳米粒子加入到普鲁兰多糖涂膜液中,可提高普鲁兰多糖涂膜的抗菌及抗氧化性能。将涂膜用于三文鱼鱼片的保鲜时,可抑制微生物的生长及脂肪氧化。此外还可提高蛋白质的溶解度、延缓抗氧化酶活性的降低。葡萄籽提取物纳米粒子/普鲁兰多糖涂膜可延长三文鱼鱼片货架期 5~7 d,显示出在水产品保鲜方面具有广阔的市场。后续可更深层探究复合涂膜对蛋白质氧化及蛋白质空间结构的影响。

参考文献

- [1] MAQSOOD S, BENJAKUL S, ABUSHELAIBI A, et al. Phenolic compounds and plant phenolic extracts as natural antioxidants in prevention of lipid oxidation in seafood: A detailed review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2014, 13(6): 1 125-1 140.
- [2] LI Q, ZHANG J, ZHU J, et al. Effects of gallic acid combined with epsilon-polylysine hydrochloride incorporated in a pullulan-cmc edible coating on the storage quality of sea bass[J]. *RSC Adv*, 2021, 11(47): 29 675-29 683.
- [3] ZAREI M, RAMEZANI Z, EIN-TAVASOLY S, et al. Coating effects of orange and pomegranate peel extracts combined with chitosan nanoparticles on the quality of refrigerated silver carp fillets[J]. *J Food Process Preserv*, 2015, 39(6): 2 180-2 187.
- [4] AO X, KIM I. Effects of grape seed extract on performance, immunity, antioxidant capacity, and meat quality in pekin ducks[J]. *Poult Sci*, 2020, 99(4): 2 078-2 086.
- [5] LIBERA J, LATOCH A, WÓJCIAK K M. Utilization of grape seed extract as a natural antioxidant in the technology of meat products inoculated with a probiotic strain of lab[J]. *Foods*, 2020, 9(1): 103.
- [6] ROY S, EZATI P, RHIM J W. Fabrication of antioxidant and antimicrobial pullulan/gelatin films integrated with grape seed extract and sulfur nanoparticles[J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2022, 5(5): 2 316-2 323.
- [7] LU Q, LI D C, JIANG J G. Preparation of a tea polyphenol nanoliposome system and its physicochemical properties [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(24): 13 004-13 011.
- [8] TALTAVULL N, MIRALLES-PEREZ B, NOGUES M R, et al. Effects of fish oil and grape seed extract combination on hepatic endogenous antioxidants and bioactive lipids in diet-induced early stages of insulin resistance in rats[J]. *Mar Drugs*, 2020, 18(6): 318.
- [9] BAEK J H, LEE S Y, OH S W. Enhancing safety and quality of shrimp by nanoparticles of sodium alginate-based edible coating containing grapefruit seed extract[J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 189: 84-90.
- [10] BAO S, XU S, WANG Z. Antioxidant activity and properties of gelatin films incorporated with tea polyphenol-loaded chitosan nanoparticles[J]. *J Sci Food Agric*, 2009, 89(15): 2 692-2 700.
- [11] HASSAN B, CHATHA S A S, HUSSAIN A I, et al. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review[J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 109: 1 095-1 107.
- [12] LUO Z, GUO Y, LIU J, et al. Microbial synthesis of poly- γ -glutamic acid: Current progress, challenges, and future perspectives[J]. *Biotechnol Biofuels*, 2016, 9(1): 1-12.
- [13] 张盼, 王俊平. 壳聚糖-普鲁兰多糖复合抗菌保鲜膜对冷鲜牛肉的保鲜效果[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(6): 194-201.
ZHANG P, WANG J P. Effect of chitosan-pullulan composite antibacterial-films on fresh-keeping of chilled beef[J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(6): 194-201.
- [14] 延梦瑶, 沈文, 刘树兴, 等. 负载姜黄素纳米粒子冷鲜肉抗氧化可食用膜的制备及表征[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, 40(2): 54-60.
YAN M Y, SHEN W, LIU S X, et al. Preparation and characterization of antioxidant edible films incorporated with curcumin nanoparticles for chilled meat [J]. *J Shaanxi University of Sci*, 2022, 40(2): 54-60.
- [15] KAMKAR A, MOLAEI-AGHAEI E, KHANJARI A, et al. Nanocomposite active packaging based on chitosan biopolymer loaded with nano-liposomal essential oil: Its characterizations and effects on microbial, and chemical properties of refrigerated chicken breast fillet[J]. *Int J Food Microbiol*, 2021, 342: 109071.
- [16] 潘飞, 赵磊, 陈艳麟, 等. 壳聚糖/ γ -聚谷氨酸负载黑米花色苷纳米粒的制备, 表征及缓释性能[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 38-44.
PAN F, ZHAO L, CHEN Y L, et al. Preparation, characterization and sustained release property of black rice anthocyanin-loaded chitosan/ γ -polyglutamic acid nanoparticles [J]. *Food Sci*, 2021, 42(10): 38-44.
- [17] 丁婷, 李婷婷, 励建荣. 0℃冷藏三文鱼片新鲜度综合评价[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(11): 252-259.
DING T, LI T T, LI J R. Comprehensive evaluation on freshness of salmon slices at 0℃ storage[J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2014, 14(11): 252-259.
- [18] 杨华, 杨丽丽, 王明, 等. 茶多酚/ ϵ -聚赖氨酸盐酸盐复合微胶囊对美国红鱼鱼片的保鲜作用[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(1): 98-105.
YANG H, YANG L L, WANG M, et al. The preservative effect of tea polyphenols/ ϵ -polylysine hydrochloride composite microcapsules on *Salmo gairdneri* fillets [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(1): 98-105.
- [19] 杨丽丽, 郝晗, 张璇, 等. 壳聚糖浓度对原位合成纳米 SiO_x 壳聚糖涂膜性能的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(5): 85-92.
YANG L L, HAO H, ZHANG X, et al. Effect of chitosan concentration on the properties of the in-situ nano SiO_x chitosan coatings[J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(5): 85-92.
- [20] YANG H, LI Q, XU Z, et al. Preparation of three-layer flaxseed gum/chitosan/flaxseed gum composite coatings with sustained-release properties and their excellent protective effect on myofibril protein of rainbow trout [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 194: 510-520.

(下转第 191 页)

- sibirica fruit [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 172: 379-387.
- [15] HAO Y J, ZHANG K X, JIN M Y, et al. Improving fed-batch culture efficiency of *Rhodiola sachalinensis* cells and optimizing flash extraction process of polysaccharides from the cultured cells by BBD-RSM [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 196: 116513.
- [16] 沈晓静, 解富娟, 周绍琴, 等. 咖啡生豆多糖提取及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 144-149, 181.
- SHEN X J, XIE F J, ZHOU S Q, et al. Extraction of polysaccharide from green coffee beans and its antioxidant activity [J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 144-149, 181.
- [17] 清源, 陈甜甜. 块菌多糖复合酶法提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 174-178.
- QING Y, CHEN T T. Optimization of the extraction of truffle polysaccharide by multi-enzyme hydrolysis[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 174-178.
- [18] 史德芳, 高虹, 谭洪卓, 等. 香菇柄多糖的微波辅助提取及其活性研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(2): 10-14.
- SHI D F, GAO H, TAN H Z, et al. Study on microwave-assisted extraction and biological activity of polysaccharide from *Lentinus edodes* stem[J]. Food Research and Development, 2010, 31(2): 10-14.
- [19] 池源, 王丽波. 苯酚—硫酸法测定南瓜籽多糖含量的条件优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 89-92.
- CHI Y, WANG L B. Study on phenol-sulfuric acid method for determination of polysaccharide content in pumpkin seeds[J]. Food & Machinery, 2014, 30(1): 89-92.
- [20] 李楠, 张香飞, 杨春杰. 板栗多糖初级结构表征及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- LI N, ZHANG X F, YANG C J. Primary structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Zizyphus jujuba* cv. banzao[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- [21] 姜慧, 孔立敏, 王翀, 等. 条斑紫菜多糖的降解条件优化及其生物活性[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 38-47.
- JIANG H, KONG L M, WANG C, et al. Optimization of degradation conditions of polysaccharides from *Porphyra yezoensis* and changes in biological activities after degradation[J]. Food Science, 2021, 42(3): 38-47.
- [22] CHEN B J, SHI M J, CUI S, et al. Improved antioxidant and anti-tyrosinase activity of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* by degradation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 715-722.
- [23] 王苗苗, 刘宗浩, 张永, 等. 2种新疆沙棘中黄酮、多酚及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 51-57.
- WANG M M, LIU Z H, ZHANG Y, et al. Analysis of the flavonoid polyphenol and its antioxidant activity of 2 kinds of sea buckthorn from Xinjiang[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 51-57.
- [24] 李昌勤, 姚辰, 朱荣遥, 等. 基于 DPPH、ABTS 和 FRAP 的中药女贞子抗氧化谱效关系研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(9): 1 670-1 677.
- LI C Q, YAO C, ZHU R Y, et al. Spectrum-effect relationship in antioxidant activity of *Ligustri Lucidi Fructus* based on DPPH, ABTS and FRAP assays [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(9): 1 670-1 677.
-
- (上接第 121 页)
- [21] FAN H, LUO Y, YIN X, et al. Biogenic amine and quality changes in lightly salt- and sugar-salted black carp (*mylopharyngodon piceus*) fillets stored at 4 °C [J]. Food Chem, 2014, 159: 20-28.
- [22] SALLAM K I, AHMED A M, ELGAZZAR M M, et al. Chemical quality and sensory attributes of marinated pacific saury (*cololabis saira*) during vacuum-packaged storage at 4 °C [J]. Food Chem, 2007, 102(4): 1 061-1 070.
- [23] 胡奇杰, 王东旭, 谷贵章. 复配生物涂膜保鲜液对冷藏南美白对虾的保鲜效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(2): 763-768.
- HU Q J, WANG D X, GU G Z. Study on the preservative effect of compound biological coating liquid on frozen South American whiteprawn[J]. J Food Saf Food Qual, 2021, 12(2): 763-768.
- [24] YANG H, LI Q, YANG L, et al. The competitive release kinetics and synergistic antibacterial characteristics of tea polyphenols/ ϵ -poly-L-lysine hydrochloride core-shell microcapsules against *shewanella putrefaciens*[J]. Int J Food Sci Technol, 2020, 55(12): 3 542-3 552.
- [25] ZHAO X, WU J, CHEN L, et al. Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on metabolite profiles of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage [J]. Food Chem, 2019, 293: 418-428.
- [26] JOUKI M, YAZDI F T, MORTAZAVI S A, et al. Effect of quince seed mucilage edible films incorporated with oregano or thyme essential oil on shelf life extension of refrigerated rainbow trout fillets[J]. Int J Food Microbiol, 2014, 174: 88-97.
- [27] FARZAD R, KUHN D D, SMITH S A, et al. Effects of selenium-enriched prebiotic on the growth performance, innate immune response, oxidative enzyme activity and microbiome of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 2021, 531: 735980.
- [28] YU D, XU Y, JIANG Q, et al. Effects of chitosan coating combined with essential oils on quality and antioxidant enzyme activities of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets stored at 4 °C [J]. Int J Food Sci Technol, 2017, 52(2): 404-412.
- [29] HERRERA J R, MACKIE I M. Cryoprotection of frozen-stored actomyosin of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by some sugars and polyols[J]. Food Chem, 2004, 84(1): 91-97.