

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.019

没食子酸对豆腐柴果胶可食膜的影响研究

史 强^{1,2,3}, 周芳芳^{2,3}, 潘铭楷^{2,3}, 刘 咏³, 王军辉^{1,2,3}

(1. 合肥工业大学 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 安徽省农产品精深加工重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:文章研究没食子酸(gallic acid, GA)对豆腐柴果胶可食膜的影响,测试添加 GA 后可食膜的理化性质、微观结构和生物活性。结果表明,添加 GA 使可食膜的颜色加深,厚度和不透明度增加,胶链与水分子的相互作用增强,水分质量分数、水溶性和溶胀率升高。由于 GA 分子渗透到胶链中,所得薄膜具有较低的拉伸强度、较高的断裂伸长率以及较强的抗氧化和抗菌性能。尤其是加入 1%GA 后,豆腐柴果胶可食膜显示出优良的机械特性和膜结构,其拉伸强度为(173.60±2.21) MPa,断裂伸长率达到 4.83%±0.23%。添加 1%GA 的可食膜也具有优良的抗氧化活性,其 DPPH 自由基清除率为 86.55%±0.63%。同时,可食膜的抗菌性能显著提高($P<0.05$)。研究表明,豆腐柴果胶可用于制备新型生物活性可食膜,为充分利用我国丰富的豆腐柴资源提供了参考。

关键词:豆腐柴果胶;没食子酸(GA);可食膜;结构表征;生物活性

中图分类号:TS206.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)10-1423-07

Effect of gallic acid on edible film of pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz.

SHI Qiang^{1,2,3}, ZHOU Fangfang^{2,3}, PAN Mingkai^{2,3}, LIU Yong³, WANG Junhui^{1,2,3}

(1. Engineering Research Center of Bio-process of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Products Processing of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 3. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this paper, the effect of gallic acid(GA) on the edible films of pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz. was investigated by examining the physicochemical properties, microstructure and biological activities of the edible films added with different concentrations of GA. The results indicated that the addition of GA deepened the color of the edible films, enhanced their thickness and opacity, boosted the interaction between the gum chains and water molecules and increased the moisture content, water solubility and swelling rate. Due to the penetration of GA molecules to the chains, the resultant films had lower tensile strength, higher elongation at break and stronger antioxidant and antibacterial properties. Especially when 1% GA was added, the edible films exhibited excellent mechanical properties and film structure. The tensile strength was (173.60±2.21) MPa, and the elongation at break reached 4.83%±0.23%. The composite films also possessed satisfactory antioxidant activities, with a DPPH free radical scavenging rate of 86.55%±0.63%. Simultaneously, the antibacterial properties of the edible films were significantly improved($P<0.05$). Thus, the current study suggests that the pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz. can be used to fabricate novel bioactive edible films and provide reference for realizing the full utilization of *Premna microphylla* Turcz.

收稿日期:2021-07-19;修回日期:2021-08-03

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(201903a06020024)

作者简介:史 强(1996—),男,河北滦州人,合肥工业大学硕士生;

刘 咏(1968—),女,安徽凤阳人,合肥工业大学教授,硕士生导师;

王军辉(1976—),男,广西陆川人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: junhuiwang@hfut.edu.cn.

resources in China.

Key words: pectin extracted from *Premna microphylla* Turcz.; gallic acid(GA); edible film; structural characterization; biological activity

0 引 言

豆腐柴(*Premna microphylla* Turcz.)是马鞭科豆腐柴属多年生落叶灌木,其叶子不仅具有多种营养成分,还含有大量果胶,占 20%左右^[1]。豆腐柴作为野生植物资源,对生存环境要求不高,生长迅速,原料丰富,具有极大的开发利用潜力和价值^[2]。

豆腐柴果胶(PEP)是一种可食用、可降解、无毒的生物高分子材料,由于其良好的凝胶特性,被认为是生产可食膜的良好原料。果胶薄膜能较好地屏蔽氧气,有良好的硬度和黏着性^[3],但也存在水敏感性高、水阻隔性差等缺点^[4]。其他成分和果胶混合可以改良果胶基薄膜的品质,从而更适于食品行业的应用,如大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)和没食子酸(3,4,5-三羟基苯甲酸)(gallic acid, GA)^[3]。大豆分离蛋白因其具有良好的起泡性、膨胀性、溶解性、乳化性和凝胶性,被广泛应用于食品工业,并且在食品生产中用于加热制备凝胶和可食膜^[5]。没食子酸是一种提取自植物实体的多酚,存在于浆果、果实和茶中,具有多种生物活性,如抗氧化、抗炎和抗癌等^[6-7]。

近年来,由不可生物降解的合成包装膜引起的环境问题日趋严重,促使研究人员开发新型的可生物降解和环境友好的包装材料^[4]。本文基于课题组前期的研究,选择最佳的配比(PEP 的质量分数为 0.3%,SPI 的质量分数为 2%,Na⁺ 的浓度为 20 mmol/L)来制备可食膜^[8]。通过添加不同质量分数的 GA(1%、2%、3%)来提高膜的保鲜性能,为开发利用我国丰富的豆腐柴资源提供了新途径。

1 材料与方 法

1.1 材料和试剂

豆腐柴粉购于黄山森林之宝生物科技有限公司;大豆分离蛋白购于郑州鸿科化工产品有限公司;没食子酸购于上海麦克林生化科技有限公司;大肠杆菌(编号为:ATCC 8099)和金黄色葡萄球菌(编号为:ATCC 6538)均由中国工业微生物菌种保藏管理中心提供;其他试剂(分析级)均购于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

Direct8 纯水机(美国 Millipore 公司);TA-XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro Systems 有限公司);STA449F5 热重分析仪(德国耐驰);Nicolet6700 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared, FTIR)仪(Thermo Fisher Scientific 公司);D/MAX2500V X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)(日本理学株式会社);Gemini 500 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(德国卡尔蔡司公司);Multiskan Go 1510 酶标仪(Thermo Fisher Scientific 公司);CR-300 比色仪(柯尼卡美能达集团);752 紫外-可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司);SW-CJ-1F 超净工作台(苏州安泰空气技术有限公司)。

1.3 豆腐柴果胶的提取

PEP 的提取是根据课题组前期的方法进行^[9],其性质和化学组成参考文献^[10]。

1.4 豆腐柴果胶可食膜的制备

称取 PEP 和 SPI 粉末溶于超纯水,添加 GA、甘油和氯化钠溶液(膜液最终含有 20 mmol/L 的钠离子)制成复合膜液,使得 GA 的质量分数为 0.1%、2%、3%。将其于 25 °C 充分搅拌,再置于直径为 90 mm 的平板中,室温放置 12 h,再于 60 °C 烘箱中烘干,最后揭膜于容器中。

1.5 物理性能的测定

1.5.1 颜色和透光性的测定

可食膜的颜色使用比色仪测量。底片颜色的指标为 a 、 b 、 L ,总色差 ΔE 的计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2},$$

其中: $L^* = 97.63$; $a^* = -0.53$; $b^* = 2.27$ 。

将可食膜切成 40 mm×10 mm 的条块,贴在比色皿上,使用紫外可见分光光度计测量其在 300~700 nm 范围内的 UV-Vis 光谱,以空气为参照得出其透光性。

1.5.2 厚度和密度的测定

在可食膜上随机取 3 点,用螺旋测微仪测量其厚度(取平均值精确到 0.001 mm)计算出其体积;规范称取可食膜矩块质量,然后用质量与体积之比得出可食膜的密度。

1.5.3 水分质量分数的测定

取 1 cm×1 cm 的可食膜薄片称其质量,记为

m_1 ,然后在 100 °C 下干燥 24 h 再称其质量,记为 m_2 。水分质量分数(w_M)的计算公式为:

$$w_M = [(m_1 - m_2)/m_1] \times 100\%$$

1.5.4 水溶解性的测定

将可食膜(1 cm×1 cm)在 60 °C 下干燥 12 h 并称其质量,记为 m_3 。将干膜浸入 25 mL 超纯水中,室温下缓缓摇晃 24 h,然后在 100 °C 下干燥 24 h 并称其质量,记为 m_4 。可食膜水溶解性(S_w)的计算公式为:

$$S_w = [(m_3 - m_4)/m_3] \times 100\%$$

1.5.5 溶胀率的测定

可食膜的溶胀率(R_s)以重量法得出。称取 1 cm×1 cm 的可食膜,记为 m_5 。将其浸入 25 mL 超纯水中 1 h,取出,用吸水纸除去膜表面水分并称质量,记为 m_6 。可食膜 R_s 的计算公式为:

$$R_s = [(m_6 - m_5)/m_5] \times 100\%$$

1.6 机械性能的测定

切取 10 mm×70 mm 的可食膜矩形,用质构仪测定膜的断裂伸长率和拉伸强度。质构仪夹距为 50 mm,拉引速度为 1 mm/s。

1.7 热重分析

称取 5 mg 可食膜样品于坩埚中。在氮气的条件下,测定样品在 35~800 °C 范围内的质量变化,升温速率为 10 °C/min。

1.8 FTIR 分析

称取可食膜样品 3 mg 与溴化钾充分混合压片,采用 FTIR 仪进行检测,扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.9 XRD 分析

XRD 测试条件为:CuK α 靶,2 θ 扫描范围 5°~60°,扫描速率 2 (°)/min。

1.10 SEM 分析

用 ETD-3000 离子溅射设备对可食膜样品进行喷金;用 Gemini 500 SEM 在 1 kV 的加速电压下放大 500 倍观察每个样品的微观结构。

1.11 抗氧化活性分析

可食膜的抗氧化活性由 DPPH 自由基清除方法测定。将 50 mg 可食膜样品加入 10 mL DP-PH/甲醇溶液(100 $\mu\text{mol/L}$)中,在 25 °C 下培养 30 min,然后于 517 nm 处测量吸光度。对照组为未添加可食膜的 DPPH 溶液。可食膜抗氧化活性的计算公式为:

$$\text{DPPH 自由基清除率} = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100\%$$

其中, A_c 、 A_s 分别为对照组和可食膜的吸光度。

1.12 抗菌活性分析

本实验使用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌对可食膜进行体外抗菌活性评价。在胰蛋白胨琼脂培养基上接种 200 μL 的细菌培养物(细胞密度为 10^4 个/mL);然后在培养基表面放置半径为 6 mm 的圆形可食膜薄片,并在 37 °C 下培养 24 h;最后测量抑菌圈的直径。

1.13 数据分析

采用 Origin 2021 软件绘制图表,利用 SPSS 21.0 软件处理数据。实验数据重复 3 次,结果以(平均值±标准差)形式表示。

2 结果分析

2.1 豆腐柴果胶可食膜的物理特性分析

2.1.1 颜色特性和透光率

可食膜的颜色和透明度是衡量消费者接受程度和产品外观的重要指标^[11]。颜色测量过程中, L^* 值越大样品越亮; a^* 值代表红绿色,绿(-)/红(+); b^* 值代表黄蓝色,蓝(-)/黄(+)^[12]。可食膜的颜色指标 L 、 a 、 b 、 ΔE 见表 1 所列。由表 1 可知:GA 的加入使 L 值显著减小($P < 0.05$),表明添加 GA 使可食膜逐渐变暗; a 值和 b 值均显著增加($P < 0.05$),说明可食膜逐渐变红; ΔE 值显著升高($P < 0.05$),由 23.37 上升到 40.06,表明可食膜的颜色由浅变深。

表 1 豆腐柴果胶可食膜的颜色参数

$w(\text{GA})/\%$	L	a	b	ΔE
0	74.31±0.92 ^a	2.38±0.22 ^d	21.34±0.85 ^d	23.37±1.07 ^d
1	70.64±0.41 ^b	3.33±0.30 ^c	29.67±0.77 ^e	32.46±0.61 ^e
2	68.36±0.47 ^c	3.86±0.12 ^b	32.81±0.39 ^b	36.21±0.49 ^b
3	63.83±0.21 ^d	4.62±0.32 ^a	35.01±0.13 ^a	40.06±0.11 ^a

注:同一列中不同小写字母上标表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异。下同。

可食膜的透光率如图 1 所示。由图 1 可知,未添加 GA 的可食膜透光性最好,GA 加入可食膜液后,透光性变差,这与文献^[13]的研究结果一致。文献^[13]发现,魔芋葡甘聚糖膜的透光率随 GA 的加入而逐渐降低,这是由于 GA 填补了成膜基质的分子间隙,阻挡了光线穿过。当 GA 的质量分数为 3% 时,可食膜的透光率在 700 nm 处从 88.17% 减小到 81.44%。由此可见,GA 的加入使豆腐柴果胶可食膜光阻隔性能增强,可以应用于某些食品行业以防止由光线诱导的脂质过氧化。

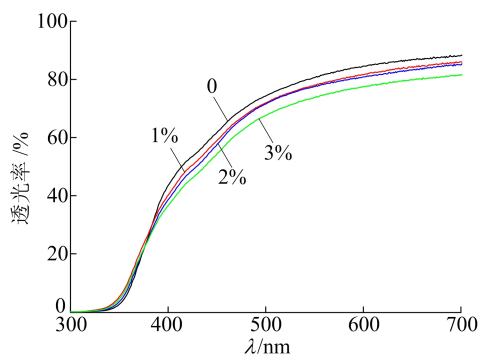


图 1 豆腐柴果胶可食膜的透光率

2.1.2 厚度和密度

薄膜的厚度直接影响其透光率、透气性、机械强度等品质^[14]。可食膜的厚度和密度见表 2 所列。由表 2 可知:膜的厚度随 GA 质量分数的增加而显著增加($P < 0.05$),这可能是成膜溶液中固体含量增多所导致的;GA 加入后,膜的密度有所减小,但变化不显著($P > 0.05$),这是由于添加 GA 使得可食膜厚度显著增加,但其质量变化不显著,导致可食膜密度降低。

表 2 豆腐柴果胶可食膜的厚度和密度

w(GA)/%	厚度/mm	$\rho/(g/cm^3)$
0	0.104±0.004 ^c	2.115±0.048 ^a
1	0.107±0.001 ^c	1.843±0.030 ^b
2	0.119±0.002 ^b	1.826±0.044 ^b
3	0.129±0.005 ^a	1.779±0.026 ^b

2.1.3 水分质量分数、水溶性和溶胀率

可食膜的水分质量分数、水溶性、溶胀率见表 3 所列。由表 3 可知,随 GA 质量分数的增加,可食膜的水分质量分数由 39.690% 上升到 46.597%,显著增大($P < 0.05$)。文献^[15]研究发现马铃薯副产品中加入 GA 后,膜的含水量由原来的 18.07% 增加至 23.11%。这是由于 GA 中含有羟基,增加了膜的亲水性,导致膜的水分质量分数升高。

水溶性是可食膜的一个重要指标,这主要是可食膜的水溶性过高会影响食品的贮藏质量^[16]。由表 3 可知,GA 质量分数增加使可食膜的水溶性增大,这是由于 GA 分子含有亲水基团,当可食膜与水接触时,亲水基团会结合水分子,导致可食膜溶于水。

溶胀率可以反映可食膜在基质中保持水分的能力,与结构中的羧基、羟基等亲水基团有关^[17]。由表 3 可知,未添加 GA 的可食膜溶胀率最低为 75.989%。文献^[8]研究表明,20 mmol/L Na^+ 能

增强 PEP-SPI 凝胶的范德华力,使得分子紧密结合,PEP-SPI-Na 膜不易再次结合水分子,使得溶胀率低。而添加 GA 后,可食膜的溶胀率随 GA 质量分数的增大而增大,最终上升到 122.715%。文献^[17]指出,壳聚糖-玉米淀粉膜的溶胀率随 GA 质量分数的增加而降低,这是由于膜与 GA 的结合在聚合物网络中形成额外的交联,限制水分渗透,抑制膜的膨胀。然而本文是以果胶和蛋白为材料制备的可食膜,材料不同可能导致添加 GA 产生相反的作用。

表 3 豆腐柴果胶可食膜的物理特性

w(GA)	w_M	S_w	R_s
0	39.690±0.154 ^b	54.432±2.711 ^c	75.989±3.462 ^c
1	45.900±0.349 ^a	73.621±3.203 ^b	101.563±5.111 ^b
2	46.310±0.632 ^a	77.190±0.663 ^b	105.270±8.253 ^b
3	46.597±0.670 ^a	83.029±1.960 ^a	122.715±7.443 ^a

2.2 豆腐柴果胶可食膜的机械性能分析

豆腐柴果胶可食膜的机械性能如图 2 所示。

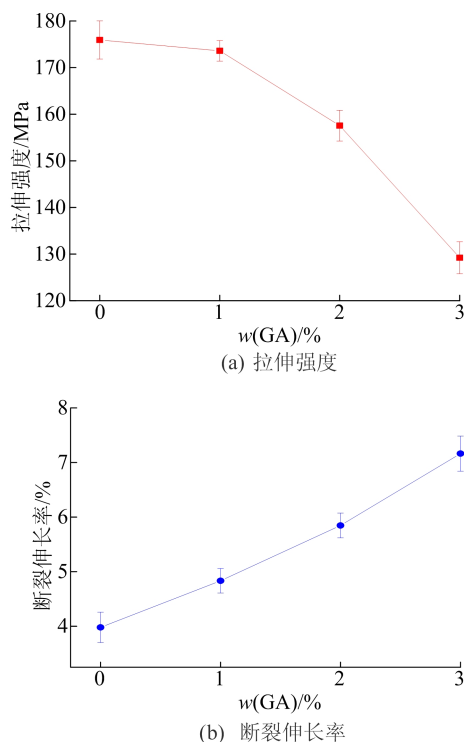


图 2 豆腐柴果胶可食膜的机械性能

由图 2a 可知,未添加 GA 的可食膜拉伸强度最大,加入 1% GA 后,可食膜拉伸强度无显著变化,但当 GA 质量分数增加至 3% 时,膜的拉伸强度显著减小($P < 0.05$)。由图 2b 可知,未添加 GA 的可食膜断裂伸长率最小,且膜的断裂伸长

率随 GA 质量分数的增加逐渐增大。文献[15]研究发现不加没食子酸的马铃薯淀粉膜的拉伸强度为 3.0 MPa,而添加没食子酸(没食子酸与马铃薯淀粉的质量比为 0.3)的膜拉伸强度减小至 1.6 MPa。但添加没食子酸会增加膜的断裂伸长率,最高达 28.2%,这种刚性降低而柔韧性增强的现象被称为塑化剂效应。

2.3 豆腐柴果胶可食膜的热重分析

豆腐柴果胶可食膜的热重分析如图 3 所示。

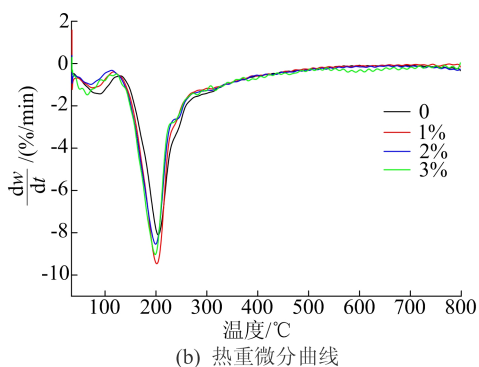
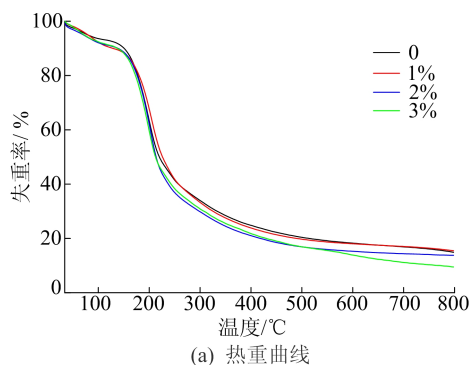


图 3 豆腐柴果胶可食膜的热重分析

从图 3a 可知,第 1 阶段的质量损失发生在 60~90 °C 之间,这是可食膜水分蒸发造成的^[18]。由图 3b 可知,未加 GA 的可食膜水分蒸发峰为 89.6 °C,添加 GA 后,水分蒸发峰逐渐降低。在 125~252 °C 之间发生了第 2 阶段的质量损失,这段质量损失最显著,膜的质量减小到 40% 左右,这是分子链的断裂和降解所致^[19]。由图 3b 可知,未添加 GA 的可食膜降解温度峰为 204.1 °C。随 GA 质量分数的增加,降解温度峰逐渐降低。结果表明,添加 GA 后可食膜的热稳定性变差。

2.4 豆腐柴果胶可食膜的 FTIR 分析

文献[12]利用 FTIR 技术研究可食膜分子间的相互作用和膜基质的结构变化。可食膜的 FTIR 谱图如图 4 所示。由图 4 可知:可食膜中添加 GA 后,没有形成额外的峰,说明 GA 与可食膜之

间没有形成共价键,它们之间的相互作用更可能为物理作用^[20];未添加 GA 的可食膜酰胺 I 键峰在 1 637.3 cm^{-1} 处,随 GA 质量分数增加,可食膜的酰胺 I 键峰波数逐渐增加,这是 SPI 分子的氨基与 GA 分子解离的羧基发生静电相互作用导致的;此外,1 048 cm^{-1} 处为 PEP 的糖环峰,随 GA 质量分数的增加,此吸收峰逐渐变弱,这是由于 GA 分子的羧基、酚羟基与 PEP 中大量羧酸根形成氢键,使 PEP 分子构象发生改变导致的。

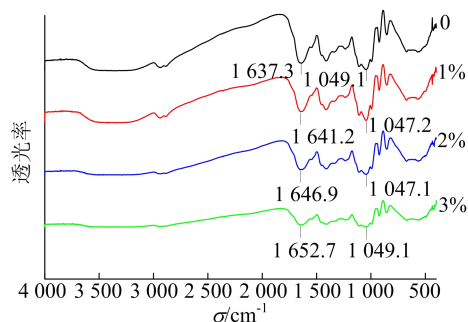


图 4 豆腐柴果胶可食膜的 FTIR 谱图

2.5 豆腐柴果胶可食膜的 XRD 分析

XRD 是评估可食膜样品结晶度的有效方法。通常情况下,复合材料的非结晶和结晶组分混溶性良好时,结晶度降低^[21]。豆腐柴果胶可食膜的 XRD 分析结果如图 5 所示。

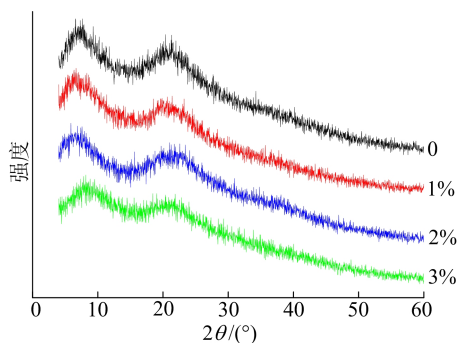


图 5 豆腐柴果胶可食膜的 XRD 图谱

从图 5 可以看出,所有样品的衍射峰均在 7.5° 和 22.0° 附近,表明在可食膜中存在无定形结构,但是随着 GA 质量分数增加,在 7.5° 和 22.0° 处峰的强度变弱。文献[22]研究发现添加 GA 于 CS 膜液之后,11° 和 20° 处的衍射峰减弱或消失。这说明 GA 的结合在一定程度上破坏了可食膜原有的半晶型状态。

2.6 豆腐柴果胶可食膜的微观结构分析

通过 SEM 观察到的可食膜截面微观结构如

图 6 所示。由图 6 可知,未添加 GA 的可食膜横截面光滑致密,添加 GA 后,GA 质量分数越大可食膜表面越粗糙。文献[23]研究指出,CS 膜和添加 0.5%GA 后的膜横截面光滑、平坦,紧凑性良好,而增加 GA 质量分数后,出现白点表明壳聚糖基质中存在异质性,并出现明显的孔隙,这些孔隙破坏了膜的结构。SEM 的结果印证了物理特性和机械性能的结果,因为 GA 质量分数的增加,膜的含水量升高,生成很多粗糙的裂纹和缝隙,所以膜的抗拉强度下降。综上所述,添加低质量分数(1%)GA 的可食膜具有较好的物理特性和机械性能。

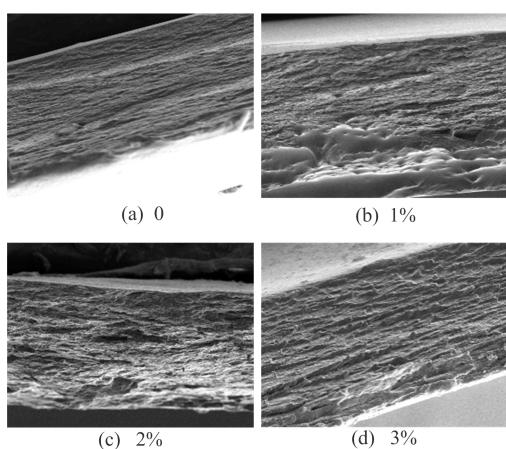


图 6 豆腐柴果胶可食膜的 SEM 图

2.7 豆腐柴果胶可食膜的抗氧化活性分析

可食膜的抗氧化能力是通过测定 DPPH 自由基清除活性来评估的。DPPH 自由基清除率如图 7 所示。

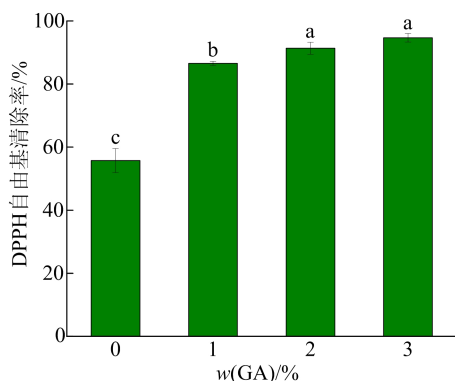


图 7 豆腐柴果胶可食膜的抗氧化活性

图 7 中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异。由图 7 可知:未添加 GA 的可食膜 DPPH 自由基清除率为 55.75%,这是由于

豆腐柴果胶本身具有一定的抗氧化活性;加入 GA 之后,可食膜抗氧化活性增强($P < 0.05$),GA 质量分数越大,膜的抗氧化活性越强;当 GA 质量分数增加至 2% 时,抗氧化活性基本稳定在 91.34% 左右。文献[24]指出,未添加 GA 的壳聚糖膜抗氧化活性为 51.4%,而添加 10% 和 20% 的 GA 后,膜的抗氧化活性分别上升到 96.2% 和 96.4%。这些结果说明,添加 GA 能显著提高可食膜的抗氧化活性。

2.8 豆腐柴果胶可食膜的抗菌活性分析

选用食品中最常见的致病菌金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)和大肠杆菌(*E. coli*),通过测量可食膜对这 2 种病菌的抑菌圈直径大小,研究可食膜的抗菌活性,结果如图 8 所示。

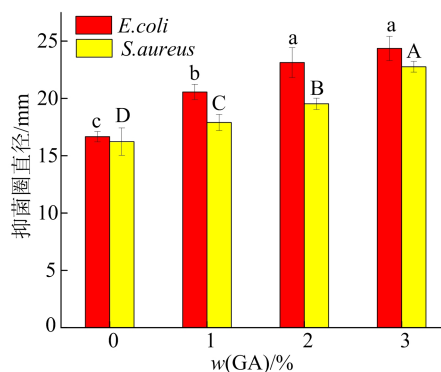


图 8 豆腐柴果胶可食膜的抗菌活性

图 8 中:不同小写字母表示抗 *E. coli* 活性在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异;不同大写字母标注表示抗 *S. aureus* 活性在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异。由图 8 可知,添加 GA 显著增强了可食膜的抗菌活性($P < 0.05$),GA 质量分数越高可食膜的抗菌活性越强。此外,*E. coli* 的抑菌圈显著大于 *S. aureus*,表明可食膜对革兰氏阳性菌的抑制作用弱于对革兰氏阴性菌的抑制作用。文献[16]报道,加入 GA 后的 GA-CS 膜和 GA-g-CS 膜的抗菌活性显著提高。但本研究中,CS 基可食膜对革兰氏阳性菌(*B. cereus* 或 *S. aureus*)的抑制作用大于对革兰氏阴性菌(*E. coli* 或 *S. typhimurium*)的抑制作用。这是本研究的成膜材料与其有所差异导致的。

3 结 论

本文制备豆腐柴果胶可食膜,并研究了 GA 对可食膜的物理特性、机械特性、微观结构和功能特性的影响。结果表明,加入适量的 GA 能改善

豆腐柴果胶可食膜的品质,当 GA 的质量分数为 1% 时,可食膜即具有良好的机械特性和物理结构,又显示出较强的抗氧化和抗菌活性。添加 GA 的豆腐柴果胶可食膜具有良好的可食性、生物降解性和生物活性,是一种很有应用前景的食品包装材料。

[参 考 文 献]

- [1] 黄莹莹,邵宇. 豆腐柴资源利用现状及对策[J]. 现代农业科技,2016(14):91-92.
- [2] 张攀,陈信,熊双丽,等. 不同预处理对豆腐柴叶果胶理化性质的影响[J]. 食品工业科技,2019,40(1):82-86,91.
- [3] RODSAMRAN P, SOTHORNVIT R. Lime peel pectin integrated with coconut water and lime peel extract as a new bioactive film sachet to retard soybean oil oxidation[J]. Food Hydrocolloids,2019,97:105173.
- [4] SUCHETA, RAI S K, CHATURVEDI K, et al. Evaluation of structural integrity and functionality of commercial pectin based edible films incorporated with corn flour, beetroot, orange peel, muesli and rice flour[J]. Food Hydrocolloids,2019,91:127-135.
- [5] WU C, HUA Y, CHEN Y, et al. Release behavior of non-network proteins and its relationship to the structure of heat-induced soy protein gels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2015,63(16):4211-4219.
- [6] LUZI F, PUGLIA D, DOMINICI F, et al. Effect of gallic acid and umbelliferone on thermal, mechanical, antioxidant and antimicrobial properties of poly (vinyl alcohol-co-ethylene) films[J]. Polymer Degradation and Stability,2018,152:162-176.
- [7] YADAV S, MEHROTRA G K, DUTTA P K. Chitosan based ZnO nanoparticles loaded gallic-acid films for active food packaging[J]. Food Chemistry,2021,334:127605.
- [8] ZHOU F F, PAN M K, LIU Y, et al. Effects of Na⁺ on the cold gelation between a low-methoxyl pectin extracted from *Premna microphylla* turcz and soy protein isolate[J]. Food Hydrocolloids,2020,104:105762.
- [9] PAN M K, ZHOU F F, SHI R H, et al. Characterizations of a pectin extracted from *Premna microphylla* turcz and its cold gelation with whey protein concentrate at different pHs [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,139:818-826.
- [10] PAN M K, ZHOU F F, LIU Y, et al. Na⁺-induced gelation of a low-methoxyl pectin extracted from *Premna microphylla* turcz[J]. Food Hydrocolloids,2021,110:106153.
- [11] LEI Y L, WU H J, JIAO C, et al. Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of pectin-konjac glucomannan composite edible films incorporated with tea polyphenol [J]. Food Hydrocolloids,2019,94:128-135.
- [12] ADILAH Z M, JAMILAH B, HANANI Z N. Functional and antioxidant properties of protein-based films incorporated with mango kernel extract for active packaging[J]. Food Hydrocolloids,2018,74:207-218.
- [13] WU C H, LI Y Z, DU Y, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan-based bionanocomposite film for active food packaging[J]. Food Hydrocolloids,2019,89:682-690.
- [14] YONG H M, WANG X C, ZHANG X, et al. Effects of anthocyanin-rich purple and black eggplant extracts on the physical, antioxidant and pH-sensitive properties of chitosan film[J]. Food Hydrocolloids,2019,94:93-104.
- [15] ZHAO Y J, SALDANA M D A. Use of potato by-products and gallic acid for development of bioactive film packaging by subcritical water technology[J]. The Journal of Supercritical Fluids,2019,143:97-106.
- [16] RUI L Y, XIE M H, HU B, et al. A comparative study on chitosan/gelatin composite films with conjugated or incorporated gallic acid[J]. Carbohydrate Polymers,2017,173:473-481.
- [17] PACHECO N, NAAI-EK M G, AYORA-TALAVERA T, et al. Effect of bio-chemical chitosan and gallic acid into rheology and physicochemical properties of ternary edible films[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,125:149-158.
- [18] WANG K, WU K, XIAO M, et al. Structural characterization and properties of konjac glucomannan and zein blend films[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2017,105:1096-1104.
- [19] LI J, MA J, CHEN S, et al. Characterization of calcium alginate/deacetylated konjac glucomannan blend films prepared by Ca²⁺ crosslinking and deacetylation [J]. Food Hydrocolloids,2018,82:363-369.
- [20] SUN L, SUN J, CHEN L, et al. Preparation and characterization of chitosan film incorporated with thinned young apple polyphenols as an active packaging material[J]. Carbohydrate Polymers,2017,163:81-91.
- [21] CUI S, LI M, ZHANG S, et al. Physicochemical properties of maize and sweet potato starches in the presence of cellulose nanocrystals [J]. Food Hydrocolloids,2018,77:220-227.
- [22] ZHANG X, LIU J, QIAN C L, et al. Effect of grafting method on the physical property and antioxidant potential of chitosan film functionalized with gallic acid[J]. Food Hydrocolloids,2019,89:1-10.
- [23] SUN X X, WANG Z, KADOUH H, et al. The antimicrobial, mechanical, physical and structural properties of chitosan-gallic acid films[J]. LWT-Food Science and Technology,2014,57:83-89.
- [24] ZARANDONA I, PUERTAS A I, DUEÑAS M T, et al. Assessment of active chitosan films incorporated with gallic acid[J]. Food Hydrocolloids,2020,101:105486.

(责任编辑 闫杏丽)