

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.008

胡宇微, 邱俊凯, 孙红男, 等. 咖啡酸/马铃薯淀粉可食性膜的制备及特性表征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 72-80.

咖啡酸/马铃薯淀粉可食性膜的制备及特性表征

胡宇微, 邱俊凯, 孙红男, 木泰华

中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193

摘要: 以咖啡酸和马铃薯淀粉为原料制备咖啡酸/马铃薯淀粉可食性膜, 探究了添加不同浓度的咖啡酸对可食性膜微观结构、物理性能、分子结构、抗氧化活性及抑菌活性的影响. 结果表明: 随着咖啡酸浓度的增加, 膜的断裂伸长率降低至 23.79%~45.81%, 透光率降低至 28.92%~76.70%, 对水蒸气透过率影响较小; FTIR 光谱分析显示咖啡酸与马铃薯淀粉之间没有新的官能团产生; 膜的抗氧化活性和抑菌活性与咖啡酸浓度呈正相关, 当咖啡酸浓度为 0.5% 时, DPPH 自由基清除活性和 Fe^{3+} 还原能力最强; 当咖啡酸添加量为 0.4% 时, 能显著抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、灰绿青霉和黑曲霉的生长. 研究结果可为可食性包装材料的工业化生产提供参考.

关键词: 可食性膜; 马铃薯淀粉; 咖啡酸; 机械性能; 抗氧化; 抑菌活性

中图分类号: F416.82; TS209

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2023)10-0072-09



Preparation and Characterization of Caffeic Acid/Potato Starch Edible Film

HU Yuwei, QIU Junkai, SUN Hongnan, MU Taihua

Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China

Abstract: In this study, caffeic acid and potato starch were used as raw materials to prepare caffeic acid/potato starch edible film. The effects of different caffeic acid concentrations on the microstructure, physical properties, molecular structure, antioxidant activity and antibacterial activity of the edible film were investigated. Results showed that with the increase of caffeic acid concentration, the elongation at break of the membrane decreased to 23.79%~45.81%, and the light transmittance decreased to 28.92%~76.70%.

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-10); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-202X-IFST).

作者简介: 胡宇微, 硕士研究生, 主要从事食品工程研究.

通信作者: 孙红男, 研究员.

The water vapor transmittance did not show significant changes. FTIR spectrum analysis showed that there was no new functional group produced between caffeic acid and potato starch. The antioxidant activity and antibacterial activity of the edible film were positively correlated with the caffeic acid concentration. When the caffeic acid concentration was 0.5%, the DPPH free radical scavenging activity and Fe^{3+} reducing ability were the highest. When the caffeic acid concentration was 0.4%, the growth of *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Penicillium griseus* and *Aspergillus niger* could be significantly inhibited. The above results can provide a reference for the industrial production of edible packaging materials.

Key words: edible film; potato starch; caffeic acid; mechanical properties; antioxidant activity; antibacterial activity

淀粉可食性膜是多糖类可食性膜的一种, 被誉为最具有发展潜力的可食性膜之一。这是由于淀粉具有良好的成膜性, 而且来源广、成本低^[1]、可食用和易成膜等优点。淀粉可食性膜可用于食品包装中^[2], 能减少传统塑料包装的使用, 且不对环境造成污染^[3]。通常用于制备淀粉可食性膜的原淀粉主要有马铃薯淀粉、甘薯淀粉、木薯淀粉、豌豆淀粉和玉米淀粉等, 其中马铃薯淀粉的支链淀粉含量较高、黏性高、分子颗粒大、糊化后透明度高, 因此马铃薯淀粉制成的包装膜较其他淀粉膜透明度更好^[4]。然而单纯的马铃薯淀粉可食性膜存在易碎和易吸潮等缺点, 因此为提高马铃薯淀粉可食性膜的综合性能, 通常加入甘油来保持淀粉可食性膜的结构完整, 同时起到保湿和塑化的作用。与此同时, 在可食性膜中加入抗菌、抗氧化等活性物质能够进一步丰富薄膜材料的功能性, 以更好地应用于食品包装领域。多酚类物质是天然的抗氧化剂, 具有优异的抗氧化能力、自由基清除能力以及抑制细菌繁殖生长的能力^[5]。目前常与可食性膜复合使用的多酚类物质主要有茶多酚、苹果多酚、葡萄籽多酚等^[6-8], 尚未见甘薯茎叶多酚类物质与淀粉可食性膜复合使用的相关报道。

我国是甘薯产量大国, 2019 年我国甘薯年产量约占世界甘薯产量的 56%^[9]。甘薯地上部分茎叶资源同样丰富, 一年中可多次采收, 产量与地下块根基本相当。然而, 我国甘薯茎叶除 2%~5% 被用作动物饲料外, 其余大多被直接丢弃, 造成严重的资源浪费和环境污染^[10]。甘薯茎叶中富含多酚类物质, 具有潜在的抗氧化、降血糖、消炎、抑菌等生物活性^[10-13], 在食品、化妆品、医药等领域具有广阔的应用前景。在我们先前的研究中采用液质联用技术对甘薯茎叶多酚的组成及各组分含量进行了分析^[14], 发现甘薯茎叶多酚主要由 9 种单一组分构成, 分别是咖啡酸、芦丁以及 7 种绿原酸类物质, 其中咖啡酸(caffeic acid, CA)的抗氧化及抑菌活性最强^[15]。

本研究拟以马铃薯淀粉、甘油以及甘薯茎叶多酚中抗氧化及抑菌活性最强的咖啡酸为原料制备咖啡酸/马铃薯淀粉可食性膜(caffeic acid /potato starch edible film, CA/PSEF)。使用质构分析仪、紫外可见分光光度计、水蒸气透过率测试仪、扫描电子显微镜、傅里叶红外光谱仪等仪器分析不同浓度咖啡酸(0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%)对马铃薯淀粉可食性膜的物理性能、微观结构、分子结构、抗氧化活性和抑菌活性的影响, 以期绿色环保可食性包装材料的生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1.1.1 仪器

紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器责任有限公司; 电热恒温水浴锅, 天津市泰斯特仪器有限公司; 精密鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 物性测试仪, 英国 Stable Micro System 公司; 水蒸气透过率测试仪, 北京丹贝尔仪器有限公司; 冷场发射扫描电镜, 日本 HITACHI 公司。

1.1.2 试剂

本实验所用马铃薯淀粉购自北京本地, 马铃薯淀粉的质量分数为 86.80%, 含水量为 13.01%。咖啡酸(纯度大于 98%)购自北京索莱宝科技有限公司。金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、灰绿青霉(*Penicillium griseus*)和黑曲霉(*Aspergillus niger*)购自中国食品发酵工业研究院有限公司。甘油(纯度 99.7%)购自山东优索化工科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 可食性膜的制备

按比例称取马铃薯淀粉和甘油(1:20)→加 100 mL 去离子水混匀→60 °C 温水中预热 30 min→100 °C 沸水浴中持续搅拌 10 min 至完全糊化→加入咖啡酸溶液持续搅拌 10 min→超声波脱气 5 min→保温静置 30 min→每 15 mL 成膜液浇铸于直径为 10 cm 的聚苯乙烯平板中→流延成膜→60 °C 热风干燥→揭膜→保存于密闭容器(相对湿度为 55%~57%)中。

1.2.2 机械性能测定

选择平整均匀无缺陷的薄膜, 切成 12 mm×50 mm 的条状, 固定于质构分析仪拉伸探头上, 探头以 0.8 mm/s 恒速拉伸 50 mm, 记录抗拉伸强度和断裂伸长率, 重复实验 5 次^[16]。

1.2.3 光学性质测定

使用 TU-1810 型紫外可见分光光度计测定样品膜在波长 300~800 nm 范围内的透光率(T)^[17]。

$$T = (-\lg T_{600})/\delta$$

式中, T_{600} 指 600 nm 处膜的光透过率, δ 为样品膜的厚度, 单位为 mm。透明度值越高, 则表示样品膜越不透明。

1.2.4 水蒸气透过率测定

薄膜的水蒸气透过率($P_{\text{水蒸气}}$)通过直径为 5.1 cm, 深度为 5.4 cm 的圆形玻璃杯进行测定。将 25 mL 水放入杯中以提高 100% 的相对湿度后, 将杯子用 3 层薄膜覆盖。将膜切成圆形, 直径为 9 cm, 并用熔化的石蜡密封。将杯子与其内容物一起称质量并置于保持在 25 °C 的干燥器中。每 12 h 对杯子称质量并测定其质量损失。计算公式为

$$P_{\text{水蒸气}} = \Delta m X / A \Delta t \Delta p$$

式中, $\Delta m / \Delta t$ 为每单位时间的湿度增量(g/s), X 为平均薄膜厚度(mm), A 为暴露薄膜的表面积(m^2), Δp 为水蒸气薄膜两侧的压差(Pa)。对于每种类型的膜, 重复测定 3 次。

1.2.5 扫描电子显微镜

利用冷场发射扫描电镜观察薄膜表面的形貌。观察前样品表面进行喷金处理, 测试时设定加速电压为 10 kV。

1.2.6 傅里叶变换红外光谱

利用傅里叶变换红外光谱仪进行各淀粉膜样品的红外吸收光谱测试。设定测试条件: 波长扫描范围 4 000~600 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数 64 次。

1.2.7 DPPH 清除活性实验

DPPH 清除活性参照孙海燕^[18]的方法。修改后具体步骤如下: 用蒸馏水将咖啡酸配置成质量浓度分别为 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的样品溶液, 取 2.0 mL 样品溶液加入 2.0 mL 6×10^{-5} mol/L DPPH 乙醇溶液, 激烈震荡后, 避光保持 60 min, 立即于 517 nm 处测定吸光值。DPPH 清除率(C_{DPPH})计算公式为

$$C_{\text{DPPH}} = [1 - (A_1 - A_2)/A_0] \times 100\%$$

式中, A_0 为 2.0 mL 的 DPPH 乙醇溶液和 2.0 mL 的蒸馏水混合后的吸光值, A_1 为 2.0 mL 的 DPPH 乙醇溶液和 2.0 mL 的样品溶液混合后的吸光值, A_2 为 2.0 mL 的乙醇溶液和 2.0 mL 的样品溶液混合后的

吸光值.

样品的 DPPH 自由基清除活性以每毫克可食性膜中含毫克咖啡酸当量表示.

1.2.8 三价铁离子(Fe^{3+})还原活性实验

三价铁离子还原活性(ferric reduce reducing antioxidant power, FRAP)的测定参照 Maqsood 等^[19]的方法. 具体步骤如下: 10 mmol/L TPTZ 溶液(溶剂为 40 mmol/L HCl 溶液)和 20 mmol/L FeCl_3 溶液(溶剂为 0.3 mol/L pH 值为 3.6 的磷酸盐缓冲溶液)及磷酸盐缓冲溶液以体积比 1:1:10 充分混匀后, 置于 37 °C 水浴锅中保温 30 min, 制得 FRAP 溶液. 用蒸馏水将各样品配成不同质量浓度的溶液(0.01, 0.05, 0.10 mg/mL), 取 0.15 mL 样品溶液, 加入 2.85 mL FRAP 溶液, 室温下避光反应 30 min, 立即于 593 nm 处测定吸光值, 以蒸馏水代替样品作为空白对照. 采用质量浓度为 10, 20, 50, 70, 100, 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的咖啡酸标准品建立标准曲线, 得线性回归方程 $y=9.7892x+0.3199$, $R^2=0.9894$. 样品的三价铁离子还原活性以每毫克可食性膜中含毫克咖啡酸当量表示.

1.2.9 抑菌实验

十字交叉划线法参考 Moreno 等^[20]的方法. 修改后具体步骤如下: 将薄膜样品制备为 10 mm×60 mm 的长条, 在超净工作台的紫外灯下灭菌 30 min 备用. 配置麦氏浊度为 0.5 的灰绿青霉、黑曲霉、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌菌悬液. 用接种环蘸取少量刚配置好的菌悬液, 在琼脂营养培养基的平板中央划线, 再将膜片贴于平板中央. 恒温培养箱中培养 24 h 后, 观察细菌的生长情况.

1.2.10 数据分析

采用 SPSS 21.0 软件进行数据分析. 所有实验最少重复 3 次, 数据用 $\bar{x} \pm s$ 表示. 方差分析(ANOVA)用 Duncan 多重比较法进行显著性检验($p < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 微观结构的影响

图 1 是不同浓度咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜扫描电镜图, 分别在放大 200 倍和 1 000 倍下观察. 未添加咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜表面和横截面整体平整, 结构紧凑密实, 无空隙、孔洞等缺陷, 表面白点为热风干燥空气中的灰尘颗粒. 随着咖啡酸浓度的增加, CA/PSEF 的表面越来越粗糙, 逐渐出现空隙、孔洞. 在咖啡酸浓度为 0.1% 时, CA/PSEF 的表面开始形成突起. 在咖啡酸浓度为 0.3% 时, CA/PSEF 的正面出现较多颗粒状的突起, 孔洞逐渐增大, 横截面结构松散, 出现较多的空隙. 在咖啡酸浓度为 0.5% 时, 横截面出现明显的孔洞. 这些数据表明 CA/PSEF 中咖啡酸与马铃薯淀粉可食性膜组分间的相容性较差, 膜的结构被破坏, 表面或内部粗糙、出现小颗粒.

2.2 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 机械性能的影响

图 2a 为不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的断裂伸长率. 在不添加咖啡酸时, 马铃薯淀粉可食性膜的断裂伸长率为 58.63%, 随着咖啡酸浓度的增加, CA/PSEF 的断裂伸长率大幅度减小. 当咖啡酸浓度为 0.1% 时, CA/PSEF 的断裂伸长率为 45.81%; 当咖啡酸浓度增加到 0.4% 时, CA/PSEF 的断裂伸长率降低至 23.79%. 说明咖啡酸的添加影响了马铃薯淀粉可食性膜原本完整的网状结构, 从而降低了断裂伸长率. 但随着咖啡酸浓度的持续增加, CA/PSEF 形成了一个新的较为稳定的网状结构, 从而断裂伸长率不再下降, 且有逐渐增加的趋势.

图 2b 为不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的拉伸强度. 在不添加咖啡酸时, 马铃薯淀粉可食性膜的拉伸强度为 1.89 MPa, 随着咖啡酸浓度的增加, CA/PSEF 的拉伸强度大幅增加. 当咖啡酸浓度为 0.1% 时, 拉伸强度显著提高到 15.79 MPa; 当咖啡酸浓度为 0.3% 时, 拉伸强度为 19.98 MPa. 说明咖啡酸能够提高 CA/PSEF 的拉伸强度, 但随着咖啡酸浓度的持续增加, 拉伸强度逐渐趋向稳定.

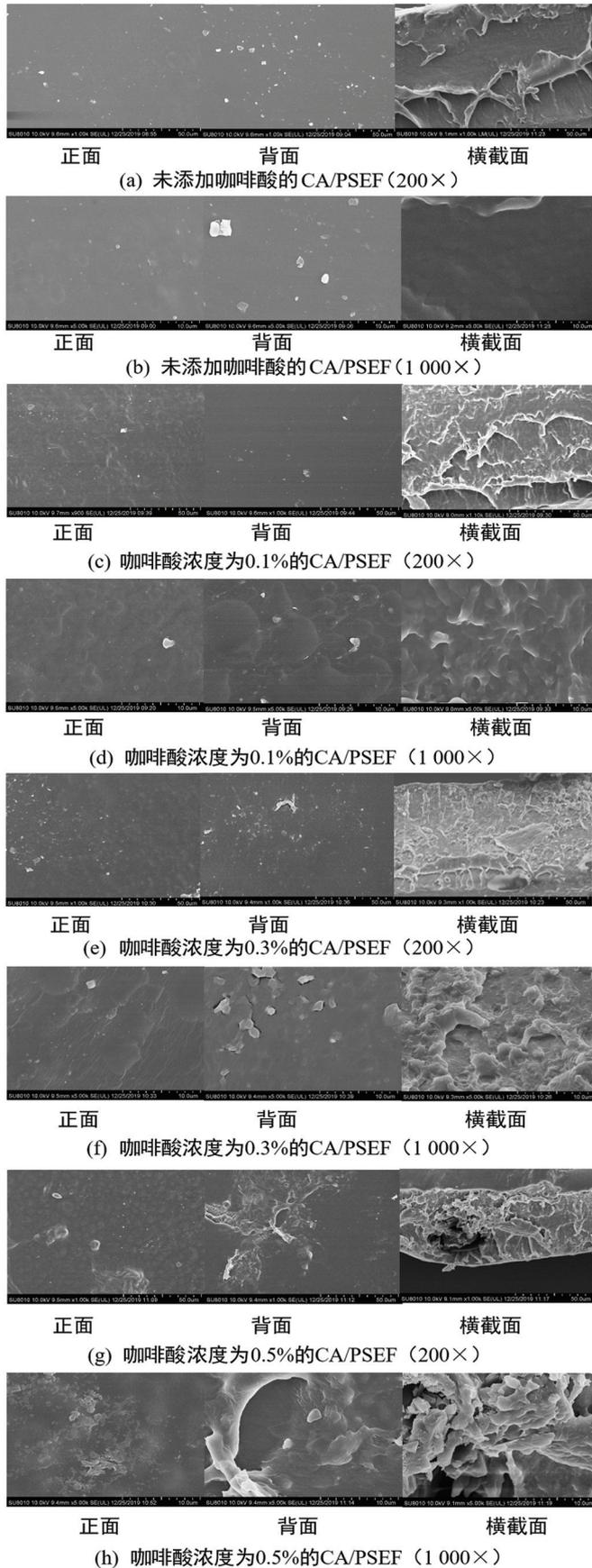


图 1 不同浓度咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜 (CA/PSEF) 的扫描电镜图

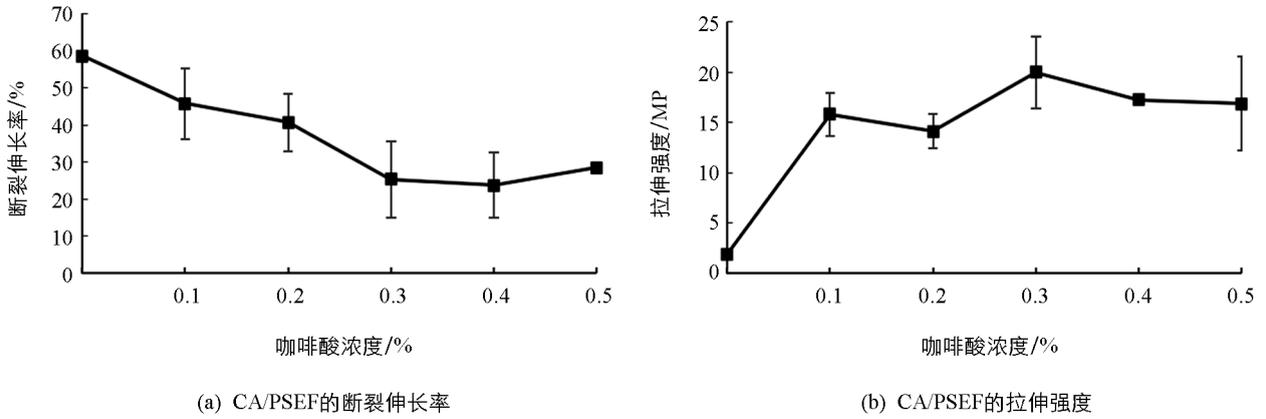


图 2 不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的断裂伸长率与拉伸强度

2.3 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 透光率的影响

不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的透光率与咖啡酸浓度成反比(表 1)。在 800 nm 波长处, 未添加咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜的透光率为 96.72%, 随着咖啡酸浓度的增加, CA/PSEF 的透光率逐渐下降。当咖啡酸浓度为 0.5% 时, CA/PSEF 的透光率降至 38.13%。造成这种现象的原因可能是咖啡酸本身为黄色结晶, 溶于热水后将原本透明的马铃薯淀粉可食性膜染成黄色, 且随着咖啡酸浓度的增加, 其黄色越来越深, 可食性膜透光率下降。当咖啡酸浓度为 0.5% 时, 淀粉糊化液中开始出现咖啡酸颗粒, 无法进一步溶解, 说明咖啡酸在淀粉糊化液中的溶解度达到饱和, 而咖啡酸颗粒的存在, 也对马铃薯淀粉可食性膜的透光率产生了一定的影响。

表 1 不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的透光率

波长/ nm	咖啡酸浓度/%					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
800	96.72±0.54a	78.12±0.64b	68.53±0.31c	59.90±0.93d	45.85±0.74e	38.13±0.43f
700	96.31±0.65a	77.73±0.45b	66.96±0.74c	64.47±0.98d	43.72±0.71e	35.77±0.57f
600	95.75±0.67a	76.70±0.46b	65.57±0.79c	60.45±0.57d	40.51±0.53e	28.92±0.68f
500	96.22±0.26a	70.02±0.91b	58.76±0.93c	55.94±0.51d	34.47±1.10e	20.35±0.46f
400	95.59±0.09a	59.40±0.75b	38.77±0.50c	36.34±1.43c	26.59±0.89d	15.41±0.92e
300	92.22±0.87a	0	0	0	0	0

注: 同行小写字母不同表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

2.4 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 水蒸气透过率的影响

图 3a 显示, 马铃薯淀粉可食性膜的水蒸气透过率为 28.15 g/m², 当咖啡酸浓度为 0.1% 时, CA/PSEF 的水蒸气透过率上升至 30.79 g/m², 但差异无统计学意义。随着咖啡酸浓度的持续增加, 水蒸气透过率开始缓慢下降。当咖啡酸浓度为 0.5% 时, CA/PSEF 的水蒸气透过率为 28.79 g/m², 趋近于马铃薯淀粉可食性膜的水蒸气透过率, 说明咖啡酸对马铃薯淀粉可食性膜的水蒸气透过率影响较小。结果表明随着咖啡酸浓度的持续增加, 水蒸气透过率逐渐下降, CA/PSEF 分子结构逐渐变得稳定, 从而接近马铃薯淀粉可食性膜的水蒸气透过率。

2.5 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 化学键的影响

图 3b 为不同浓度咖啡酸的 CA/PSEF 在 500~4 000 cm⁻¹ 波长范围内的 FITR 光谱图。马铃薯淀粉可食性膜在 3 290 cm⁻¹ (O—H 拉伸), 2 918 cm⁻¹ (烷基的 C—H 拉伸), 1 645 cm⁻¹ (O—H)、1 336 cm⁻¹ (CH₂ 拉伸), 1 001 cm⁻¹ (C—O—C 拉伸) 和 968 cm⁻¹ (吡喃糖环拉伸) 处出现了特征吸收峰。所有浓度咖啡酸的 CA/PSEF 均表现出与马铃薯淀粉可食性膜相似的 FITR 光谱, 在咖啡酸加入到淀粉可食性膜中后,

可以发现 CA/PSEF 与马铃薯淀粉可食性膜呈现相似的谱图, 没有出现新的波峰, 因此说明马铃薯淀粉与咖啡酸之间的反应没有新的化学键生成.

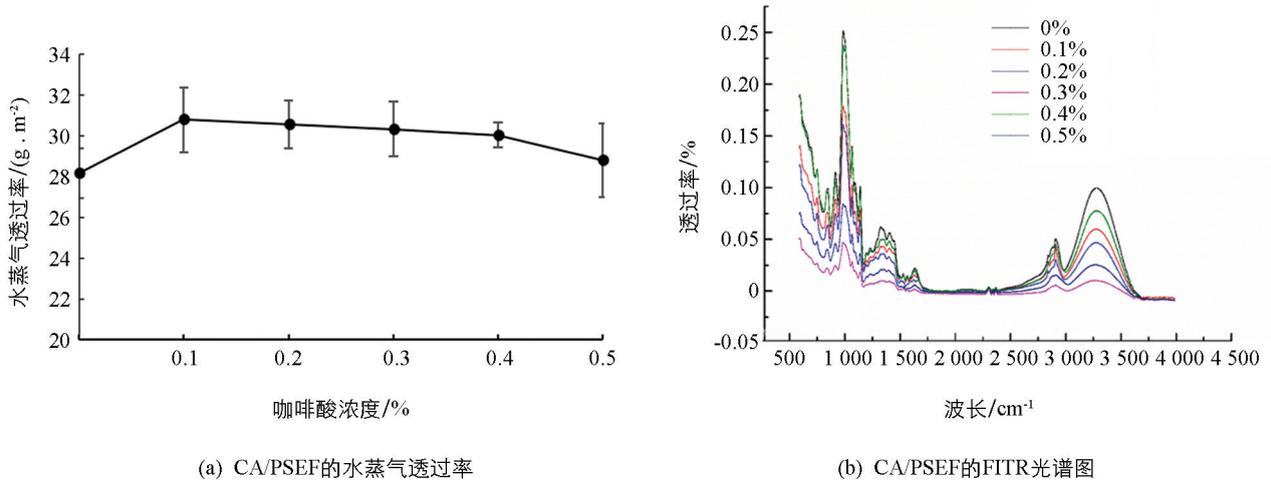


图 3 不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的水蒸气透过率和 FTIR 光谱图

2.6 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 的 DPPH 自由基清除能力和 Fe^{3+} 还原活性的影响

从图 4 可以看到, 未添加咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜没有 DPPH 自由基清除能力, 说明马铃薯淀粉可食性膜本身并没有 DPPH 自由基清除能力. 而随着咖啡酸浓度的增加, 可食性膜的 DPPH 自由基清除能力开始呈上升趋势, 且与咖啡酸浓度成正比, 在咖啡酸浓度为 0.5% 时达到 0.120 1 mg 咖啡酸当量, 说明咖啡酸的加入能够为马铃薯淀粉可食性膜提供一定的抗氧化活性, 可用于食品保鲜.

图 4b 显示未添加咖啡酸的马铃薯淀粉可食性膜没有 Fe^{3+} 还原活性, 而随着咖啡酸浓度的增加, 同样 Fe^{3+} 还原活性开始出现上升趋势, 在咖啡酸浓度为 0.5% 时达到 0.129 8 mg 咖啡酸当量. 进一步证明咖啡酸的加入能够为马铃薯淀粉可食性膜提供一定的抗氧化活性.

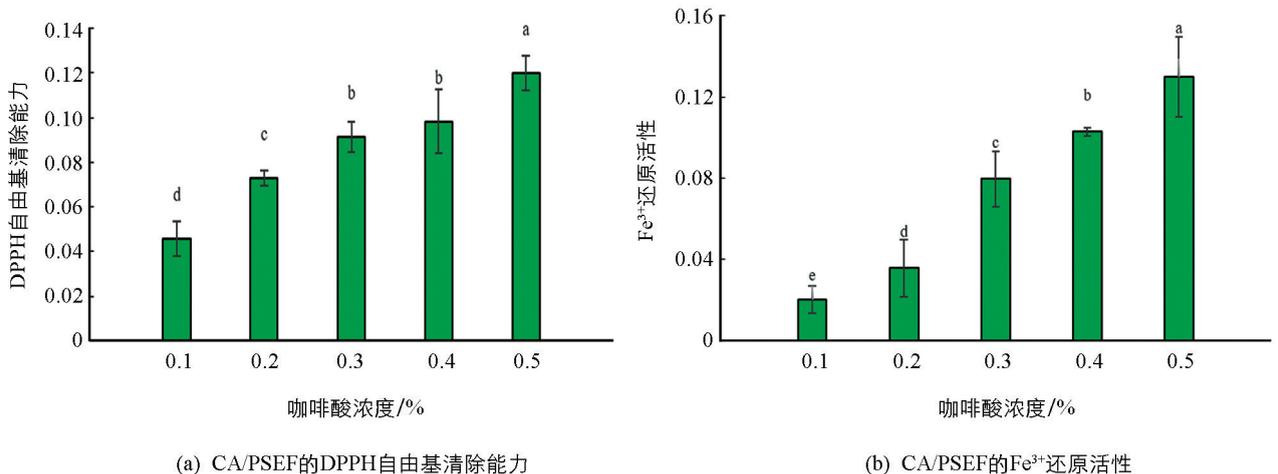
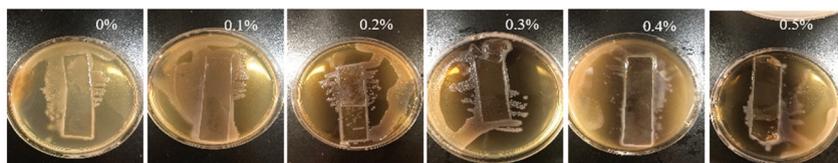


图 4 不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的 DPPH 自由基清除能力和 Fe^{3+} 还原活性

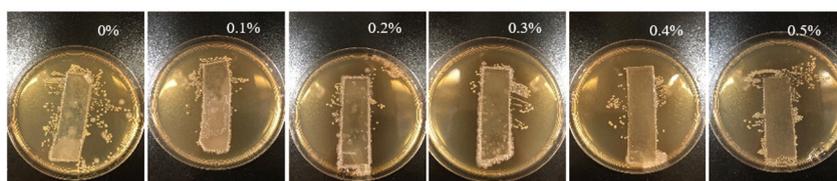
2.7 不同浓度咖啡酸对 CA/PSEF 的抑菌活性的影响

图 5 为不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的抑菌活性, 可以发现金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、黑曲霉以及灰绿青霉能够在咖啡酸浓度为 0% 的马铃薯淀粉可食性膜培养基上正常生长, 并可在其覆盖面下生长, 说明马铃薯淀粉可食性膜对这 4 种微生物的生长均未起到抑制作用. 当 CA/PSEF 的咖啡酸浓度为 0.1% 时, 观察到这 4 种微生物依旧围绕 CA/PSEF 生长, 但是其覆盖面下的微生物数量显著减少; 当 CA/PSEF 的咖啡酸浓度为 0.2% 时, 金黄色葡萄球菌和大肠杆菌少量生长于覆盖面下, 灰绿青霉和黑曲霉少量生长于 CA/PSEF 周边, 说明 0.2% 浓度咖啡酸的 CA/PSEF 能够显著抑制灰绿青霉和黑曲霉的生长, 一定程度上

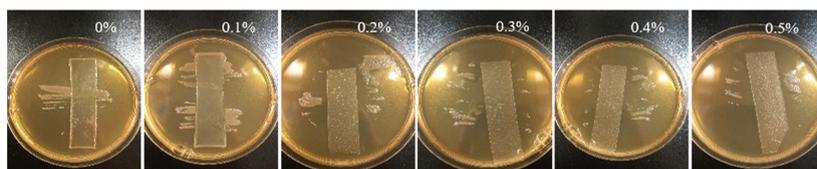
抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长; 当 CA/PSEF 的咖啡酸浓度为 0.3% 时, 金黄色葡萄球菌和大肠杆菌未在覆盖面下生长, 而黑曲霉和灰绿青霉也不再围绕 CA/PSEF 周边生长; 当 CA/PSEF 的咖啡酸浓度为 0.4% 时, CA/PSEF 完全抑制了这 4 种微生物在其覆盖面下生长, 仅出现少量金黄色葡萄球菌和大肠杆菌围绕 CA/PSEF 进行生长, 说明该浓度下的 CA/PSEF 能够对这 4 种微生物生长起到明显的抑制作用; 当 CA/PSEF 的咖啡酸浓度为 0.5% 时, 同样仅出现少量金黄色葡萄球菌和大肠杆菌围绕 CA/PSEF 进行生长. 结果表明, 咖啡酸的加入使得马铃薯淀粉可食性膜出现了明显的抑菌效果, 其中对黑曲霉和灰绿青霉的抑制作用要显著优于金黄色葡萄球菌和大肠杆菌.



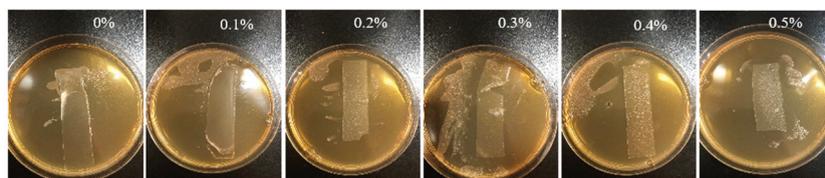
(a) 对金黄色葡萄球菌的抑制作用



(b) 对大肠杆菌的抑制作用



(c) 对黑曲霉的抑制作用



(d) 对灰绿青霉的抑制作用

图 5 不同浓度咖啡酸 CA/PSEF 的抑菌活性

3 结论

甘薯茎叶多酚作为一种天然植物添加剂, 具有良好的抗氧化活性和抑菌活性, 但从未应用于可食性膜中. 将甘薯茎叶多酚中抑菌活性最强的咖啡酸添加到马铃薯淀粉可食性膜中, 发现咖啡酸的添加会导致马铃薯淀粉可食性膜的机械性能和透光率下降, 主要原因可能是咖啡酸破坏了马铃薯淀粉可食性膜原本稳定的网状结构, 但随着咖啡酸浓度的持续增加, 可食性膜能逐渐形成新的较为稳定的网状结构. 研究结果还显示马铃薯淀粉可食性膜本身并不具有任何抗氧化活性和抑菌活性, 但随着咖啡酸浓度的增加, 可食性膜的抗氧化活性和抑菌活性得到显著提高, 因此, 咖啡酸和马铃薯淀粉共同制备可食性膜可为绿色环保包装材料的开发提供思路和理论支撑.

参考文献:

[1] 杨月, 陆丹英, 凌静, 等. 交联木薯淀粉对蜜橘涂膜保鲜效果研究 [J]. 食品科学, 2011, 32(6): 275-278.

- [2] 于文喜, 胡长鹰, 王志伟. 天然可食/可降解抑菌膜研究进展 [J]. 功能材料, 2015, 46(17): 17001-17007.
- [3] 王君, 乔翼娇, 胡文. 可食性壳聚糖膜的制备及功能特性研究 [J]. 包装与食品机械, 2019, 37(4): 15-18, 63.
- [4] 许卉佳, 刘仁杰. 可食性马铃薯淀粉抑菌膜的研究 [J]. 食品科技, 2017, 42(3): 195-198.
- [5] 刘雪梅. 多酚与河蚬多肽复合物的抗氧化活性及消化特性研究 [D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2022.
- [6] 梁杰, 蔡力锋, 刘涛, 等. 茶多酚对海藻酸钠/玉米淀粉复合膜的影响及保鲜应用 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(1): 7-16.
- [7] 闫青青, 朱伟超, 艾延文, 等. 苹果多酚/壳聚糖复合膜的制备及其对冷却牛肉蛋白氧化影响的研究 [J]. 食品科技, 2021, 46(6): 128-134.
- [8] 田玉潭, 马露, 刘军, 等. 葡萄酒渣多酚-壳聚糖-CMC 可食性复合膜在水煮羊肉贮藏中的应用 [J]. 浙江农业学报, 2021, 33(6): 1095-1103.
- [9] HU Y W, SUN H N, MU T H. Effects of Sweet Potato Leaf Powder on Sensory, Texture, Nutrition, and Digestive Characteristics of Steamed Bread [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16697.
- [10] 席利莎. 甘薯茎叶营养成分及其多酚抗氧化活性的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 34-48.
- [11] 谢克英, 杨庆莹, 孙瑞琳, 等. 红薯叶的营养研究 [J]. 河南农业, 2015(14): 37-38.
- [12] TRUONG V D, MCFEETERS R F, THOMPSON R T, et al. Phenolic Acid Content and Composition in Leaves and Roots of Common Commercial Sweetpotato (*Ipomea batatas* L.) Cultivars in the United States [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(6): 343-349.
- [13] ISLAM M D S, YOSHIMOTO M, YAHARA S, et al. Identification and Characterization of Foliar Polyphenolic Composition in Sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) Genotypes [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(13): 3718-3722.
- [14] XI L S, MU T H, SUN H N. Preparative Purification of Polyphenols from Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Leaves by AB-8 Macroporous Resins [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 166-174.
- [15] 霍锦双, 隋伟策, 孙红男, 等. 甘薯茎叶多酚类物质的组分构成及抑菌活性 [J]. 新疆农业科学, 2021, 58(3): 556-564.
- [16] CHEN C H, KUO W S, LAI L S. Water Barrier and Physical Properties of Starch/Decolorized Hsian-tsao Leaf Gum Films: Impact of Surfactant Lamination [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2): 200-207.
- [17] NILSUWAN K, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Properties, Microstructure and Heat Seal Ability of Bilayer Films Based on Fish Gelatin and Emulsified Gelatin Films [J]. Food Biophysics, 2017, 12(2): 234-243.
- [18] 孙海燕. 贺兰山东麓干红葡萄酒多酚组分与其抗氧化、抗癌活性的关联性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [19] MAQSOOD S, BENJAKUL S. Comparative Studies of Four Different Phenolic Compounds on *in vitro* Antioxidative Activity and the Preventive Effect on Lipid Oxidation of Fish Oil Emulsion and Fish Mince [J]. Food Chemistry, 2010, 119(1): 123-132.
- [20] MORENO O, ATAR S L, CHIRALT A. Effect of the Incorporation of Antimicrobial/Antioxidant Proteins on the Properties of Potato Starch Films [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 133: 353-364.

责任编辑 周仁惠