马钰, 张靖杭, 王程宇, 等. Fe/Cu MOF-酒石酸复合物在香蕉保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 164−171. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040154
MA Yu, ZHANG Jinghang, WANG Chengyu, et al. Fe/Cu MOF-Tartaric Acid Complexes for Banana Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 164−171. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040154

· 研究与探讨 ·

Fe/Cu MOF-酒石酸复合物在香蕉保鲜中的应用

马　钰, 张靖杭, 王程宇, 姜毓君, 曲　波, 满朝新*
（东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要: 低温、气调包装等传统保鲜方法往往仅针对单一保鲜需求，无法兼顾水果保鲜过程中的细菌滋生、酶促褐变、风味流失等多重问题，亟需研发兼具高效、环保、多功能的新型保鲜技术。因此，本研究制备了一种具有优异的抗菌及抗褐变能力的 Fe/Cu 金属有机框架-酒石酸复合物（Fe/Cu MOF-TA），有望为水果提供一种新型、绿色、高效的保鲜材料。以 Fe/Cu MOF 为框架对酒石酸进行负载，通过扫描电镜和傅里叶红外光谱对其进行表征，并通过抑菌实验和多酚氧化酶抑制率评价其抗菌及抗褐变能力。结果表明，在 5 种有机酸（柠檬酸、琥珀酸、肉桂酸、酒石酸和苹果酸）中，酒石酸的多酚氧化酶抑制率最高，且酒石酸浓度在 0~1.0 g/L 范围内时，香蕉多酚氧化酶的活性及褐变程度均随酒石酸的浓度增加而降低。通过扫描电镜观察发现 Fe/Cu MOF-TA 呈现边缘圆润，表面粗糙的双锥结构，傅里叶变换红外光谱表明酒石酸与 MOF 通过氢键作用形成复合物。复合物的酒石酸负载率为 21.77%。复合物具有优异的抗菌、抗氧化及多酚氧化酶抑制能力，其对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈直径分别为 2.5 cm 和 2.2 cm，最小抑菌浓度为 0.0625 mg/mL，多酚氧化酶抑制率为 76.03%，显著高于 Fe/Cu MOF 及酒石酸。

关键词: 水果保鲜, 多酚氧化酶抑制剂, 抑菌, MOF-酒石酸复合物
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0164−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040154
本文网刊:

Fe/Cu MOF-Tartaric Acid Complexes for Banana Preservation

MA Yu, ZHANG Jinghang, WANG Chengyu, JIANG Yujun, QU Bo, MAN Chaoxin*
（College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: Conventional preservation methods such as low temperature and modified atmosphere packaging often target a single preservation requirement. However, these methods cannot address multiple problems such as bacterial growth, enzymatic browning, and loss of flavor during fruit preservation. Consequently, the development of efficient, environment-friendly, and multifunctional preservation technologies was imperative for maintaining fruit quality. In this study, an Fe/Cu metal–organic framework-tartaric acid complex (Fe/Cu MOF-TA) with excellent antibacterial and anti-browning properties was synthesized, which was expected to provide a new, green, and efficient preservation material for fruits. The successful preparation of the Fe/Cu MOF-TA was confirmed using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). The antibacterial and anti-browning properties of the Fe/Cu MOF-TA were evaluated through antibacterial experiments and the inhibition rate of polyphenol oxidase. The results demonstrated that, among the five organic acids (citric acid, succinic acid, cinnamic acid, TA, and malic acid), TA exhibited the most significant inhibitory effect on polyphenol oxidase activity. Furthermore, when the concentration ranged from 0 to 1.0 g/L, the polyphenol oxidase activity and degree of browning of the bananas exhibited an inversely proportional relationship with increasing concentrations of TA. The SEM images indicated that the Fe/Cu MOF had a bicone structure with a rough surface and rounded edges. FT-IR analysis indicated the formation of a complex between TA and the Cu/Fe MOF through

收稿日期: 2025−04−14
作者简介: 马钰（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 13125906537@163.com。
*** 通信作者:** 满朝新（1978−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 乳品科学技术, E-mail: 87402577@qq.com。

hydrogen bonding. In addition, the TA loading rate of the Fe/Cu MOF-TA was 21.77%. Furthermore, the minimum inhibitory concentration of the Fe/Cu MOF-TA against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* was 0.0625 mg/mL. The rate of inhibition of polyphenol oxidase by the Fe/Cu MOF-TA was 76.03%. The results demonstrated that Fe/Cu MOF-TA possesses remarkable antibacterial, antioxidant, and polyphenol oxidase inhibitory properties.

Key words: fruit preservation; polyphenol oxidase inhibitor; antibacterial; MOF-tartatic acid complex

水果是人类饮食中不可或缺的重要组成部分，富含多种对人体健康至关重要的营养物质，包括维生素、矿物质、膳食纤维和抗氧化物质等[1−4]。然而，水果在采后运输过程中，其呼吸作用和代谢活动仍在持续，致使水果腐败变质，造成营养流失和品质下降[5]。此外，微生物侵染、水分流失以及酶促反应等因素也会加速水果的腐败过程[6−7]。在水果的腐败过程中，多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase, PPO）扮演了重要角色。PPO 是一种广泛存在于植物组织中的酶，当水果受到机械损伤或暴露于空气中时，PPO 会催化酚类物质氧化为醌类物质，进而形成褐色聚合物，导致水果发生褐变[8]。香蕉作为日常生活中常见的水果，其 PPO 活性较高，因此在加工和运输过程中极易发生褐变，不仅影响外观，还会降低其营养价值和食用品质[9]。

为了抑制 PPO 活性并减缓酶促褐变，目前已有多种方法被研究和应用，主要有化学抑制剂类化合物（如抗坏血酸、亚硫酸盐[10−11]）、天然提取物类化合物（如槲皮素、绿原酸[12−13]）、蛋白质类化合物（乳清蛋白、酶解肽段[14]）和有机酸（柠檬酸、酒石酸[15]）等。其中，有机酸因其高效、安全且易于操作的特点，成为抑制酶促褐变的常用方法。有机酸通过降低 pH、直接抑制 PPO 活性以及作为还原剂阻断醌类物质的形成，有效延缓褐变过程[16]。相较于其他方法，使用有机酸抑制酶促褐变具有自身独特的优势，主要包括安全性高，对人体无害；成本低，易于大规模应用和对水果的营养成分和风味影响较小等[17−18]。

金属有机框架（Metal Organic Framework, MOF）是由中心金属离子与有机配体配位组成的杂化多孔材料[19]，具有高表面积，孔隙结构，结构可调控等优点[20−21]。MOF 的结构及内部的金属离子赋予了其优异的抗菌能力，使得 MOF 在抗菌方面得到了广泛应用，He 等[22] 制备了具有优异抗菌特性的 Co-MOF 材料，经近红外光照射 10 min 后其对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率达到了 97% 和 100%。近年来有研究通过将 MOF 与其他功能物质相结合，以起到增大其功能范围和协同增效的作用[23]，Cheng 等[24] 将表面素与 ZIF-8-NH_2 相偶联，发现该复合物对荧光假单胞菌的最小抑菌浓度（MIC）为 0.0625 mg/mL，具有良好的抑菌能力。除此之外，MOF 材料负载其他物质还可以达到对负载物质可控释放的效果，Lei 等[25] 利用 UIO-66 负载姜黄素以运输姜黄素至结肠，实现其在结肠病变部位的缓释作用。将有机酸与 MOF 相结合既可以做到抑制水果褐变和抗菌的双重作用，又能起到对有机酸可控释放的作用。本研究通过 PPO 抑制率、褐变指数、总酚含量、DPPH 自由基清除能力及 $ABTS^+$ 自由基清除能力等指标从 5 种有机酸（柠檬酸、肉桂酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸）中筛选出抑制香蕉褐变效果最强的有机酸及相应的浓度，将其与 Fe/Cu MOF 材料结合制备成复合物，对其进行表征，并对其多酚氧化酶抑制率、抗菌性能进行评价。本研究通过制备 Fe/Cu MOF-酒石酸复合物为果蔬提供新型保鲜材料，并为有机酸抑制果蔬褐变提供一种新方法。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

香蕉　当地超市购买；酒石酸（TA）、柠檬酸、$FeCl_3$　天津市凯通化学试剂有限公司；L-苹果酸　天津市大茂化学试剂厂；肉桂酸、邻苯二酚、对苯二甲酸、$CuCl_2·2H_2O$　上海麦克林生化科技有限公司；琥珀酸　天津奥普升化工有限公司；三氯乙酸　上海展云化工有限公司；总酚试剂盒　上海生工生物工程有限公司；DPPH　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；N,N-二甲基甲酰胺（N,N-Dimethylformamide, DMF）　天津市天力化学试剂有限公司；所有试剂均为分析纯。

FA2204B 分析天平　上海诺科仪器仪表有限公司；ThermoX1R 离心机　美国 Thermo 公司；Tecan Infinite 200 PRO 多功能酶标仪　北京普天新桥技术有限公司；CM-700D 色差仪　日本柯尼卡美能达公司；SU8010 场发射扫描电子显微镜　日本日立公司；Nicolet IS15 傅里叶变换红外光谱仪　美国赛默飞世尔科技有限公司；TGA8000 热重分析仪　美国铂金埃尔默公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品 PPO 酶液的制备　样品前处理方法参考 Zhang 等[26] 的方法并稍作修改。将香蕉用清水洗净，均匀切块，称取 25 g 香蕉加入到 100 mL PBS（0.01 mol/L, pH6.8）中并放到榨汁机中进行榨汁。榨汁完毕后将香蕉汁进行离心（10000 r/min, 10 min），离心后取上清液作为 PPO 酶液用于试验。

1.2.2　PPO 抑制率测定　参考江宏伟[27] 的方法并加以修改，在试管中加入 1 mL、0.1 mol/L 邻苯二酚溶液，并加入不同浓度的柠檬酸、肉桂酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸（浓度为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL）各 1 mL，混匀后在 30 ℃ 的水浴锅中水浴 10 min，水浴完成后加入 1 mL 酶液在 30 ℃ 反

应 1 min, 反应完成后立即加入 1 mL 三氯乙酸终止反应。将反应液于 420 nm 下测量吸光度值, 蒸馏水替代反应液作为对照。PPO 抑制率按公式(1)进行计算。

$$\text{PPO 抑制率}(\%)=\frac{\Delta OD_1-\Delta OD_2}{\Delta OD_2} \quad \text{式（1）}$$

其中, ΔOD_1 为样品组在 420 nm 下的吸光度值; ΔOD_2 为对照组在 420 nm 下的吸光度值。

1.2.3 不同酒石酸浓度对香蕉褐变的影响 香蕉内部的酚类物质、抗氧化物质含量能够侧面反映香蕉的褐变程度, 本研究以香蕉的褐变指数、总酚含量、抗氧化能力(DPPH 自由基清除率、$ABTS^+$自由基清除率)为指标评价不同浓度酒石酸(浓度为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL)对香蕉褐变效果的影响。

1.2.3.1 待测样品的制备 待测样品的制备方法参照 1.2.1 步骤进行。其中, 将 PBS 溶液替换为浓度为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 g/L 的酒石酸溶液。

1.2.3.2 褐变指数的测定 参考田学智等[28] 的方法并加以修改, 使用色差仪测定褐变指数(BI)。将待测样品在 37 ℃ 下储存 24 h, 在不同时间点(0、2、4、6、8、10、12 和 24 h)测定样品。在测定时将待测样品混匀倒入航空杯, 将仪器进行白板校正后进行测量, 并通过公式(2)进行计算。

$$BI=\frac{\left[100\times\left(\frac{a^*+1.75L^*}{5.645L^*+a^*-0.3012b^*}-0.31\right)\right]}{0.172} \quad \text{式（2）}$$

其中, L^*为样品处理后亮度值; a^*为样品处理后红色值; b^*为样品处理后黄色值。

1.2.3.3 总酚含量测定 参考 Tian 等[29] 的方法, 采用 Folin-ciocalteu 法测定样品的总酚含量, 并以不同浓度的没食子酸溶液绘制标准曲线, 根据标准曲线得到样品的总酚含量(y=0.2797x−0.0017, R^2=0.9993)。植物总酚含量以样品质量计算(mg/g)。

1.2.3.4 抗氧化能力测定 按照 Shimada 等[30] 描述的方法测量样品的 DPPH 自由基清除率, 并稍作调整。首先, 将 0.1 mL 样品加入 2 mL DPPH(0.1 mmol/L)中, 充分振荡摇匀, 然后避光反应 30 min, 在 517 nm 处记录吸光度值。无水乙醇替代 DPPH 为空白组, 0.1 mL 样品加入 2 mL 无水乙醇为对照组。DPPH 自由基清除率如式(3)所示:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{\Delta OD_2-\Delta OD_1}{\Delta OD_0}\right)\times 100 \quad \text{式（3）}$$

其中, ΔOD_2 为试验组的吸光度; ΔOD_1 为对照组的吸光度; ΔOD_0 为空白组的吸光度。

1.2.4 Fe/Cu MOF-TA 复合物的表征及性能评价 本研究以 $FeCl_3$ 和 $CuCl_2$ 为金属离子, 对苯二甲酸为金属框架, 通过溶剂热法制备了 Fe/Cu MOF, 随后将 Fe/Cu MOF 与 TA 通过物理搅拌混合制备得到 Fe/Cu MOF-TA 复合物。材料制备示意图如图 1 所示。

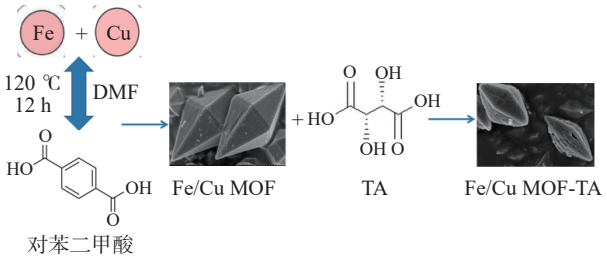


图 1 材料制备示意图

Fig.1 Schematic diagram of material preparation

1.2.4.1 Fe/Cu MOF 的合成 按照 Chen 等[31] 的方法合成 Fe/Cu MOF, 并稍作修改。称取 0.54 g $FeCl_3$、0.152 g $CuCl_2{\cdot}2H_2O$ 和 0.166 g 对苯二甲酸溶于 50 mL DMF, 超声 1 h 使反应物完全溶解, 随后装入反应釜中在烘箱中 120 ℃ 条件下反应 12 h。反应完毕后离心, 随后用 DMF 和无水乙醇洗涤 3 次, 最后放入烘箱进行烘干, 所得样品即为 Fe/Cu MOF。

1.2.4.2 Fe/Cu MOF-TA 复合物的合成 称取 0.1 g Fe/Cu MOF 材料和 0.01 g 酒石酸溶于 100 mL 蒸馏水中, 搅拌 1 h 后离心。离心完毕后倒出上清液, 将沉淀重新溶于蒸馏水中进行冻干, 收集冻干粉末用于后续试验。

1.2.4.3 微观形貌观察 采用场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)表征 Fe/Cu MOF 及 Fe/Cu MOF-TA 复合物的形貌及分散情况。将干燥的材料分别用玛瑙研钵研磨, 挑取少量粉末粘于样品台上, 镀膜并观察, 仪器的加速电压一般设置为 5~15 kV。

1.2.4.4 傅里叶红外变换光谱分析 采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)对 Fe/Cu MOF 及 Fe/Cu MOF-TA 复合物的化学键组成进行分析。首先将制备得到的样品进行干燥, 接着分别取少量干燥样品与一定量的干燥光谱级溴化钾粉末混合, 在洁净的玛瑙研钵中充分研磨, 将研磨后的测试样通过压片机压片, 得到含有样品的较为透明的均匀薄片, 放入仪器中检测。待测样品的红外光谱图通过在 4000~400 cm^{-1} 的范围内以 4 cm^{-1} 的分辨率扫描 64 次记录得到。

1.2.4.5 热重分析 通过热重分析对 Fe/Cu MOF-TA 的热稳定性进行分析, 称取 0.1 g Fe/Cu MOF 和 0.1 g Fe/Cu MOF-TA 复合物进行热重分析, 其中温度范围为 25~600 ℃, 使用氮气作为保护气, 流速为 20 mL/min, 加热速率为 10 ℃/min。

1.2.4.6 TA 负载率的测定 TA 负载率的测定参考酸碱滴定法进行, 以酚酞为指示剂, 使用邻苯二甲酸标定的 NaOH 进行滴定, 记录不同浓度酒石酸(0.1、0.08、0.06、0.04、0.02 和 0 g/L)滴定所需 NaOH 的体积, 并绘制标准曲线 y=124.96x+0.087, 相关系数为 0.9994, 其中, y 为氢氧化钠体积, mL; x 为酒石酸

质量浓度，g/L。按照 1.2.4.2 制备 Fe/Cu MOF-TA 溶液并进行离心，对离心后的上清液进行滴定，结果代入标准曲线计算出对应 TA 的质量浓度。TA 负载率如式(4)所示：

$$\text{TA 负载率}(\%)=\frac{(c_1-c_2)V}{m}\times 100 \qquad \text{式（4）}$$

其中，c_1 为未离心溶液中 TA 的浓度，0.1 g/L；c_2 为离心之后上清液中 TA 的浓度，g/L；m 为 Fe/Cu MOF 质量，g；V 为溶液的体积，L。

1.2.4.7　抗菌能力评价　Fe/Cu MOF-TA 的抗菌能力通过 MIC 和抑菌圈试验进行评价。

最小抑菌浓度(MIC)的测定：参考 96 孔板微量法对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的 MIC 进行测定，将所有指示菌培养至对数期，使用分光光度计调节吸光度至 0.5($OD_{600\ nm}$)，加入 100 μL 的菌液，然后在每组菌液中分别加入 Fe/Cu MOF 及 Fe/Cu MOF-TA 复合物溶液，配制终体积为 200 μL，放置于恒温培养箱中，条件为 37 ℃ 培养 24 h，孔板中清晰透明未有微生物生长的最低浓度为最小抑菌浓度。

参考 Lei 等[32] 的方法通过圆盘琼脂扩散法评估 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 复合物的抗菌性能，使用金黄色葡萄球菌和大肠杆菌作为实验细菌。将消毒后的滤纸片浸入溶液中，并放置在含有细菌的琼脂平板表面，然后将平板在培养箱中 37 ℃ 培养 24 h，并测量 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 复合物的抑菌圈直径；MOF、TA、MOF-TA 的 PPO 抑制率测定同 1.2.2。

1.3　数据处理

本文中实验均进行了 3 次平行，数据采用 SPSS 2.0 软件进行单因素方差分析，结果以平均差±标准差(Mean±SD)进行表示，采用 Origin 9.0 和 GraphPad 8.0 软件进行绘图，其中 $P<0.05$ 表示显著差异，$P<0.01$ 表示极显著差异。

2　结果与分析

2.1　有机酸种类对 PPO 抑制率的影响

如图 2 所示，5 种有机酸对香蕉 PPO 活性抑制效果为：酒石酸>肉桂酸>柠檬酸>苹果酸>琥珀酸，酒石酸抑制效果优于其他有机酸，可能是因其分子构象更易与 PPO 活性中心的 Cu^{2+}结合，起到抑制作用[33]。此外，随着有机酸浓度从 0.2 g/L 增长到 0.6 g/L，酒石酸对香蕉 PPO 的抑制率呈现明显的上升趋势($P<0.05$)。当酒石酸大于 0.6 g/L 时，酒石酸对香蕉 PPO 抑制率趋于平稳，这可能归因于 0.6% 时酒石酸对 PPO 活性中心的螯合作用已接近极限。基于上述结果，后续选择酒石酸作为 PPO 抑制剂用于后续试验。

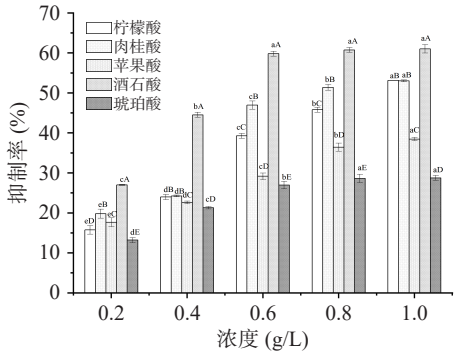


图 2　不同有机酸种类及浓度对香蕉 PPO 抑制作用

Fig.2　Inhibitory effects of different types and concentrations of organic acids on PPO in bananas

注：不同小写字母表示相同有机酸种类，不同有机酸浓度具有显著性差异($P<0.05$)；不同大写字母表示不同有机酸种类，相同有机酸浓度具有显著性差异($P<0.05$)。

2.2　酒石酸对香蕉褐变指数的影响

水果的褐变指数是体现水果褐变程度最直观的指标[34]。由表 1 可见，随着贮藏时间的增加，各组样品的褐变指数均显著增加($P<0.05$)。在相同时间点，添加了酒石酸的样品组褐变指数均比对照组显著降低($P<0.05$)，且随着酒石酸浓度的增加，样品的褐变指数逐渐降低。上述结果表明加入酒石酸能够显著抑制香蕉的褐变，且呈剂量依赖性。

2.3　酒石酸对香蕉总酚含量的影响

水果的总酚含量是指水果中所有酚类化合物的含量，酚类化合物是水果中重要的抗氧化剂，而水果中的 PPO 会氧化酚类化合物为醌类物质，导致水果发生褐变，因此通过测定水果的总酚含量可以反映水果易发生褐变的程度[35]。图 3 展示了在不同酒石酸浓度下香蕉的总酚含量，从图 3 中可以看出，随着酒

表 1　不同酒石酸浓度对香蕉汁褐变指数的影响

Table 1　Effect of different tartaric acid concentration on browning index of banana juice

贮藏时间(h)	0 g/L	0.2 g/L	0.4 g/L	0.6 g/L	0.8 g/L	1.0 g/L
0	4.70 ± 0.25^{hA}	4.70 ± 0.25^{hA}	4.70 ± 0.25^{hA}	4.70 ± 0.25^{hA}	4.70 ± 0.25^{hA}	4.70 ± 0.25^{hA}
2	10.46 ± 0.14^{gA}	8.70 ± 0.04^{gB}	8.21 ± 0.12^{gC}	7.40 ± 0.09^{gD}	6.59 ± 0.05^{gE}	5.88 ± 0.07^{gF}
4	14.42 ± 0.16^{fA}	12.60 ± 0.21^{fB}	11.21 ± 0.15^{fC}	9.55 ± 0.10^{fD}	8.63 ± 0.07^{fE}	7.81 ± 0.16^{fF}
6	19.52 ± 0.24^{eA}	15.58 ± 0.08^{eB}	14.58 ± 0.15^{eC}	13.33 ± 0.34^{eD}	12.02 ± 0.17^{eE}	11.06 ± 0.08^{eF}
8	23.46 ± 0.12^{dA}	20.52 ± 0.39^{dB}	18.21 ± 0.04^{dC}	17.19 ± 0.03^{dD}	16.22 ± 0.17^{dE}	15.59 ± 0.19^{dF}
10	29.64 ± 0.34^{cA}	24.74 ± 0.07^{cB}	22.09 ± 0.03^{cC}	20.60 ± 0.26^{cD}	18.98 ± 0.08^{cE}	18.34 ± 0.19^{cF}
12	33.71 ± 0.08^{bA}	29.55 ± 0.43^{bB}	27.28 ± 0.07^{bC}	24.84 ± 0.12^{bD}	22.69 ± 0.05^{bE}	21.44 ± 0.22^{bF}
24	38.60 ± 0.16^{aA}	33.68 ± 0.06^{aB}	31.60 ± 0.37^{aC}	29.42 ± 0.11^{aD}	27.23 ± 0.07^{aE}	25.56 ± 0.08^{aF}

注：不同小写字母表示同一酒石酸添加量，不同贮藏时间的数据具有显著性差异($P<0.05$)；不同大写字母表示同一贮藏时间，不同酒石酸添加量的数据具有显著性差异($P<0.05$)。

石酸浓度的增加，香蕉的总酚含量呈增加趋势，当 TA 浓度为 1.0 g/L 时，总酚含量相较于对照组从 2.60 mg/g 提升至 4.34 mg/g，提高了 66.92%（P<0.05），表明酒石酸能够抑制香蕉中酚类物质被 PPO 氧化，更好地维持香蕉的颜色稳定。李佩艳等[36]用草酸处理采后银条，发现 0.9 g/L 草酸处理后银条的总酚含量提高了 12.65%，本研究所得结果高于其研究结果。

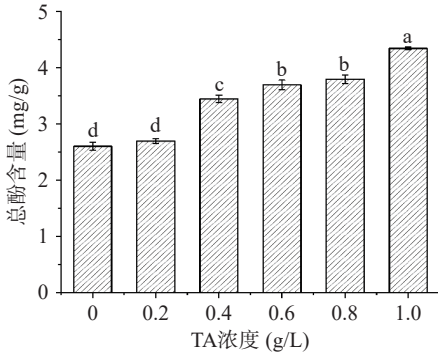


图 3 不同浓度酒石酸对香蕉总酚含量的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of tartaric acid on total phenolic content of banana

注：不同小写字母表示不同添加量具有显著性差异（P<0.05）。

2.4 酒石酸对香蕉 DPPH 自由基清除率的影响

DPPH 自由基清除率是衡量物质抗氧化能力的重要指标，反映样品中抗氧化物质清除 DPPH 自由基（1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基）的能力[37]。水果中的多酚类物质及维生素 C 等抗氧化成分具有清除 DPPH 自由基的能力，从而起到间接抑制水果褐变的作用[38]。从图 4 中可以看出，对照组具有 58.23% 的 DPPH 自由基清除率，表明未添加酒石酸的香蕉中仍然具有丰富的酚类物质。而随着酒石酸浓度的增加，DPPH 自由基清除率逐渐增加，在 1.0 g/L 时 DPPH 自由基清除率升高至 74.68%，表明酒石酸能够更好地保护香蕉中的酚类物质，从而达到清除 DPPH 自由基的效果。孟创鸽等[39]对菊苣中 5 种提取物（菊苣酸、木犀草苷、绿原酸、咖啡酸和酒石酸）进行抗氧化能力测定，发现在 5 种提取物中酒石酸具有最好的自由基清除能力，本实验结果与之一致。

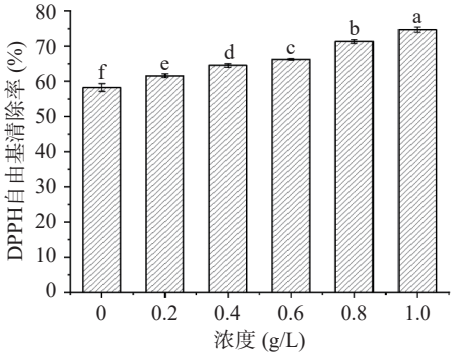


图 4 不同浓度酒石酸对香蕉 DPPH 自由基清除率的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of tartaric acid on DPPH free radical clearance in banana

注：不同小写字母表示不同酒石酸添加量具有显著性差异（P<0.05）。

2.5 Fe/Cu MOF-TA 微观形貌观察

图 5 为 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的 SEM 图像，通过观察图 5(a)发现，Fe/Cu MOF 材料呈现棱角分明的十二双锥结构，表明 Fe/Cu MOF 的成功合成。而观察图 5(b)发现，合成的 Fe/Cu MOF-TA 呈现边缘圆润，表面粗糙的双锥结构，其原因可能是 TA 吸附在了 Fe/Cu MOF 表面，并未通过内部作用力改变 Fe/Cu MOF 的晶体形态。

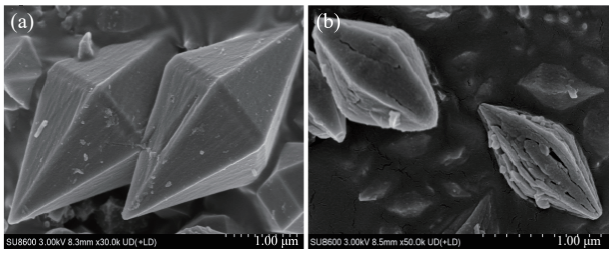


图 5 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的 SEM 图像

Fig.5 SEM images of Fe/Cu MOF and Fe/Cu MOF-TA

注：(a)为 Fe/Cu MOF 的 SEM 图像；(b)为 Fe/Cu MOF-TA 的 SEM 图像。

2.6 傅里叶红外光谱分析

由图 6 可见，Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 在 1589、1406、1316、1031 和 556 cm^{-1} 处出现吸收峰，分别对应对苯二甲酸羧酸根的不对称伸缩振动（1550~1650 cm^{-1}）、苯环 C=C 振动（1400~1600 cm^{-1}）、羧酸根对称伸缩振动（1300~1400 cm^{-1}）、C-O 伸缩振动（1000~1300 cm^{-1}）及 MOF 中金属-氧伸缩振动（<700 cm^{-1}）。与 Fe/Cu MOF 相比，Fe/Cu MOF-TA 的上述波峰未发生偏移，表明 TA 的加入未对 Fe/Cu MOF 结构造成破坏。氢键的 O-H 伸缩在 3200~3400 cm^{-1} 范围内，由图 6 中可见 Fe/Cu MOF-TA 在 3283 cm^{-1} 处的峰相较于 Fe/Cu MOF 在 3307 cm^{-1} 处的波峰发生了偏移，表明氢键的形成。

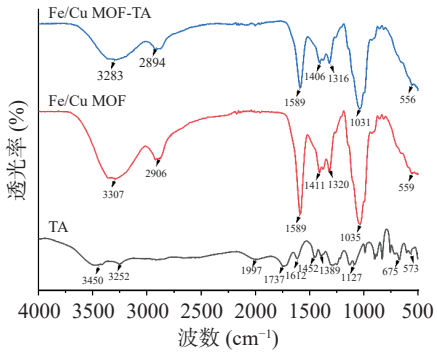


图 6 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的 FT-IR 图像

Fig.6 FT-IR images of Fe/Cu MOF and Fe/Cu MOF-TA

2.7 Fe/Cu MOF-TA 的热重分析

图 7 为 Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的热重曲线，可以看出在 0~200 ℃ 之间 2 种材料的质量损失率较为接近，主要是因为在这一阶段主要挥发成分

为材料中残留的水；从 200 ℃ 开始 Fe/Cu MOF-TA 的质量损失率逐渐高于 Fe/Cu MOF，其中在 200~400 ℃ 时 Fe/Cu MOF 中的有机配体开始挥发，而 Fe/Cu MOF-TA 中除有机配体挥发外，其中的 TA 也开始挥发，从而使得其质量损失率高于 Fe/Cu MOF；在 400~600 ℃ 时 2 种材料中的 MOF 骨架发生坍塌，最终残留物为 Fe 和 Cu 的氧化物。

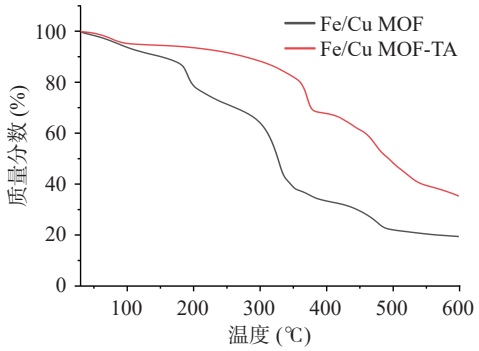


图 7　Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的 TGA 图像

Fig.7　TGA images of Fe/Cu MOF and Fe/Cu MOF-TA

2.8　Fe/Cu MOF-TA 抗菌性能评价

对复合物中 TA 负载率进行测定得到复合物中 TA 的负载率为 21.77%。后续通过抑菌圈和最小抑菌浓度对 Fe/Cu MOF-TA 复合物的抑菌性能进行了评价。

抑菌圈可以更为直观地反映材料对致病菌的抑制能力[40]。大肠杆菌（*E. coli*）和金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）作为环境中最常见的 2 类致病菌，通过研究材料对 2 类致病菌的抑制效果可以评估材料对致病菌的广谱抗菌能力。通过图 8 可以看到，Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 都具有显著的抑菌作用，主要是因为 MOF 可以通过破坏细胞膜、产生氧化应激损伤及干扰细菌代谢等机制达到抑菌作用[41]。Fe/Cu MOF 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径为 2.2 cm 和 2.0 cm。相较于 Fe/Cu MOF，Fe/Cu MOF-TA 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径可以达到 2.5 cm 和 2.2 cm，表明添加了 TA 后复合物具有了更强的抑菌能力，其主要原因可能是 TA 中的羧基和羟基可以破坏细菌细胞膜和抑制细菌代谢，从而起到抑菌作用[42]，加入 TA 可以增强材料的抑菌能力。Cheng 等[43] 制备的 ZnAg@PAN 双金属 MOF 纳米材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈直径分别为 1.71 cm 和 1.51 cm，本研究所得结果高于其结果。

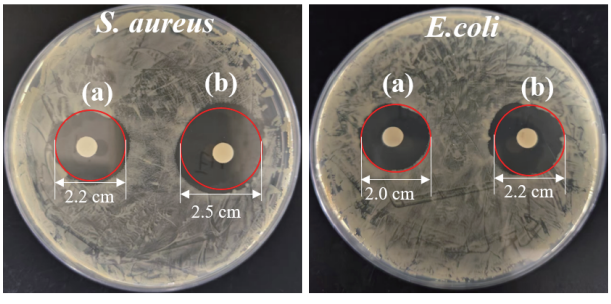


图 8　Fe/Cu MOF-TA 的抑菌性能

Fig.8　Antibacterial capacity of Fe/Cu MOF-TA

注：(a)为 Fe/Cu MOF 对 *S.aureus* 和 *E.coli* 的抑菌圈；(b)为 Fe/Cu MOF-TA 复合物对 *S.aureus* 和 *E.coli* 的抑菌圈。

最小抑菌浓度（Minimum inhibitory concentration, MIC）是抗菌剂完全抑制细菌生长的最小浓度，能够精确反映抗菌剂的效力[44]。由表 2 可知，Fe/Cu MOF 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的 MIC 均为 0.125 mg/mL，而 Fe/Cu MOF-TA 对两种致病菌的 MIC 降低至 0.0625 mg/mL，表明 Fe/Cu MOF-TA 的抑菌效果明显优于 Fe/Cu MOF，该结果与上述抑菌圈结果保持一致。

表 2　Fe/Cu MOF 和 Fe/Cu MOF-TA 的 MIC

Table 2　MIC of Fe/Cu MOF and Fe/Cu MOF-TA

材料		MIC值(mg/mL)						
		2	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.03125
E. coli	Fe/Cu MOF	−	−	−	−	−	+	+
	Fe/Cu MOF-TA	−	−	−	−	−	−	+
S. aureus	Fe/Cu MOF	−	−	−	−	−	+	+
	Fe/Cu MOF-TA	−	−	−	−	−	−	+

注：−为具有抑制效果，+为不具有抑制效果。

2.9　MOF-TA 的 PPO 抑制效果分析

由图 9 可以看出，单一的 Fe/Cu MOF 材料 PPO 抑制率较低，仅为 16.6%，其 PPO 抑制能力来源于 Fe/Cu MOF 中的 Cu^{2+}对 PPO 的抑制作用。而 Fe/Cu MOF-TA 的抑制率为 76.03%，高于单一 TA 的抑制率（59.80%）（P<0.05），一方面因为 Fe/Cu MOF 和 TA对 PPO 具有双重抑制作用，另一方面 Fe/Cu MOF 的多孔结构具有缓释作用，维持 TA 在局部处于高浓度水平，持续抑制 PPO[45]。

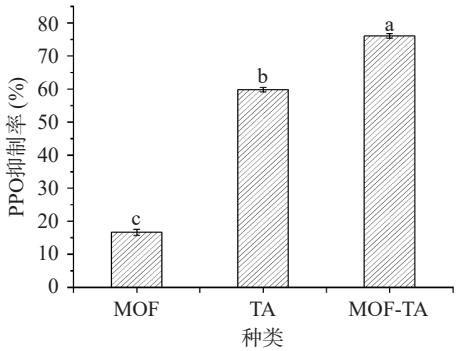


图 9　Fe/Cu MOF-TA 对 PPO 的抑制效果

Fig.9　Inhibition effect of Fe/Cu MOF-TA on PPO

注：不同小写字母表示数据具有显著差异，P<0.05。

3　结论

本研究通过溶剂热法成功构建 Fe/Cu MOF 载体，并通过氢键作用高效负载酒石酸，形成兼具抑菌和抑制褐变能力的 Fe/Cu MOF-TA 复合物。对比研究柠檬酸、苹果酸、酒石酸、肉桂酸和琥珀酸对香蕉多酚氧化酶的抑制效果，证实酒石酸抑制能力最为突

出。浓度梯度实验表明，在 0~1.0 g/L 范围内，随酒石酸浓度升高，香蕉 PPO 活性及褐变程度呈下降趋势。Fe/Cu MOF-TA 复合物呈现边缘圆润，表面粗糙的双锥结构，具有良好的热稳定性。TA 负载率为 21.77% 时，Fe/Cu MOF-TA 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的 MIC 均为 0.0625 mg/mL，PPO 抑制率为 76.03%，展现出优异的抑菌和抑制 PPO 活性的能力，在香蕉保鲜中具有良好的应用潜力。

© The Author(s) 2026. 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] ABEYSURIYA H I, BULUGAHAPITIYA V P, JAYATISSA L P. Variation of vitamin C content and antioxidant capacities during the post-harvest storage of fresh fruits under different temperatures[J]. Journal of Stored Products Research, 2024, 109: 102426.

[2] MOURA H V, DE F R M F, QUEIROZ A J D M, et al. Investigation of the mineral profile, structural and thermal properties of blends of trapiá powder with tropical fruits[J]. Future Foods, 2024, 10: 100499.

[3] LOPES L C, MORO C T, BARBOSA D L B, et al. Investigation of the chemical structure and analgesic and anti-inflammatory properties of polysaccharides that constitute the dietary fibers of soursop (*Annona muricata*) fruit[J]. Food Research International, 2023, 166: 112588.

[4] OLIVEIRA A C D, CRUZ J M D A, MAR J M, et al. Abiu-do-Mato (*Pouteria caimito*, Sapotaceae): A promising Amazonian fruit with rich chemical composition, antioxidant potential, and cytotoxic safety[J]. Food Research International, 2025, 205: 115984.

[5] WANG Y, JIA W, WANG X, et al. Tea polyphenols coating improves physiological properties, microstructure and chemical composition of cuticle to suppress quality deterioration of passion fruit during cold storage[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141524.

[6] 朱寒冰, 明瑞虎, 张媛, 等. 市售草莓腐败菌的分离鉴定及拮抗酵母的筛选[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 98−104. [ZHU H B, MING R H, ZHANG Y, et al. Isolation and identification of spoilage organism in strawberry and screening of antagonistic yeast[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 98−104.]

[7] ZOU X, HU J, PAN Y, et al. Composite enzymatic hydrolysis for producing Harlikar apple juice with increased dietary fiber content and antioxidant capacity[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105508.

[8] 李彩云, 李洁, 严守雷, 等. 果蔬酶促褐变机理的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 283−292. [LI C Y, LI J, YAN S L, et al. Progress in research on the mechanism of enzymatic browning in fruits and vegetables[J]. Food Science, 2021, 42(9): 283−292.]

[9] 梅阳, 吴燕. 不同抑制剂对鲜榨香蕉汁中多酚氧化酶活力的影响[J]. 食品安全导刊, 2023(15): 67−69. [MEI Y, WU Y. Effects of different inhibitors on the activity of polyphenol oxidase in fresh pressed banana juice[J]. China Food Safety Magazine, 2023(15): 67−69.]

[10] 栾羽菲. 褐变抑制剂及 ε-聚赖氨酸对鲜切马铃薯保鲜效果研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024. [LUAN Y F. Study on the effect of browning inhibitors and ε-polylysine on the preservation of fresh-cut potatoes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.]

[11] 崔明月, 曲亚男, 蒋丽娜, 等. 抑制剂对杏多酚氧化酶抑制作用[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 225−229. [CUI M Y, QU Y N, JIANG L N, et al. Inhibition effects on the polyphenol oxidase of apricot[J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 225−229.]

[12] MENDOZA-WILSON A M, BALANDRÁN-QUINTANA R R, VALDÉS-COVARRUBIAS M Á, et al. Potential of quercetin in combination with antioxidants of different polarity incorporated in oil-in-water nanoemulsions to control enzymatic browning of apples[J]. Journal of Molecular Structure, 2022, 1254: 132372.

[13] YOU W, WANG C, ZHANG J, et al. Exogenous chlorogenic acid inhibits quality deterioration in fresh-cut potato slices[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138866.

[14] DENG P, ZHANG Y, DENG Q, et al. Multifunctional sodium alginate-based self-healing edible cross-linked coating for banana preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109753.

[15] XIAO L, HUANG H, LIU W, et al. Integrated transcriptome and proteome analysis reveals the regulatory mechanisms of citric acid and L-Cysteine treatment in mitigating browning and senescence of postharvest litchi fruit[J]. LWT, 2025, 221: 117604.

[16] 李京赞, 刘玉德, 石文天, 等. 植物果蔬的褐变及抑制的研究[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 63−68. [LI J Z, LIU Y D, SHI W T, et al. Advances in research on browning and inhibition of plant fruits and vegetables[J]. Packaging and Food Machinery, 2019, 37(1): 63−68.]

[17] 刘文静, 张映霞, 罗立新, 等. 褐变抑制剂对果蔬多酚氧化酶的影响[J]. 食品安全导刊, 2024(3): 173−176. [LIU W J, ZHANG Y X, LUO L X, et al. Effect of browning inhibitors on polyphenol oxidase in fruits and vegetables[J]. China Food Safety Magazine, 2024(3): 173−176.]

[18] SONG Z, QIAO J, TIAN D, et al. Glutamic acid can prevent the browning of fresh-cut potatoes by inhibiting PPO activity and regulating amino acid metabolism[J]. LWT, 2023, 180: 114735.

[19] DOAN T D, VU N N, HOANG T L G, et al. Metal-organic framework (MOF)-based materials for photocatalytic antibacterial applications[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2025, 523: 216298.

[20] JIAO L, SEOW J Y R, SKINNER W S, et al. Metal–organic frameworks: Structures and functional applications[J]. Materials Today, 2019, 27: 43−68.

[21] JOSEPH S, KEMPAIAH D M, BENZIGAR M, et al. Metal organic framework derived mesoporous carbon nitrides with a high specific surface area and chromium oxide nanoparticles for CO_2 and hydrogen adsorption[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(40): 21542−21549.

[22] HE Y, LIN A, LIN G, et al. MOF-based bifunctional materials enables stepwise enhancement in antibacterial activity and Fenton-like catalytic degradation of organic pollutants[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1024: 180188.

[23] 朱禹豪, 杨亚非, 曹东丽, 等. 金属有机骨架衍生氧化物材料作为 MALDI-TOF MS 基质用于氨基酸分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 298−306. [ZHU Y H, YANG Y F, CAO D L, et al. MOF-derived oxides used as MALDI-TOF MS matrix for the determination of amino acids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 298−306.]

[24] CHENG Y, LI Y, ZHANG J, et al. Surfactin conjugated ZIF-8-NH_2 based MOF with the antibacterial ability against *Pseudomonas fluorescens* and its application in salmon preservation[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105491.

［25］ LEI H, LIU Y, LI J, et al. Colon-targeted dual-coating MOF nanoparticles for the delivery of curcumin with anti-inflammatory properties in the treatment of ulcerative colitis[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2025, 250: 114545.
［26］ ZHANG S, WANG S, LI Y, et al. Ursolic acid, a natural endogenous compound, inhibits browning in fresh-cut apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113228.
［27］ 江宏伟. 不同 pH 下肉桂酸及其衍生物对多酚氧化酶的抑制作用[D]. 南昌：南昌大学, 2024. ［JIANG H W. Inhibitory effect of cinnamic acid and its derivatives on polyphenoloxidase at different pH[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.］
［28］ 田学智, 曹智鸿, 江乃相, 等. 高静压联合天然抑制剂处理对浑浊苹果汁多酚氧化酶活性及相关品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 1−7. ［TIAN X Z, CAO Z H, JIANG N X, et al. Effect of high hydrostatic pressure combined with natural inhibitors on polyphenol oxidase activity and related quality attributes of cloudy apple juice[J]. Food Science, 2025, 46(2): 1−7.］
［29］ TIAN X, YANG Y, ZHANG W, et al. Effect of high hydrostatic pressure and thermal processing on the shelf life and quality attributes of apple-kiwi-carrot puree blend[J]. Journal of Food Quality, 2023, 2023(1): 1631285.
［30］ SHIMADA K, FUJIKAWA K, YAHARA K, et al. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1992, 40(6): 945−948.
［31］ CHEN K R, ZHOU A W, ZHOU X Y, et al. Cellular trojan horse initiates bimetallic Fe-Cu MOF-mediated synergistic cuproptosis and ferroptosis against malignancies[J]. Science Advances, 2024, 10(15).
［32］ LEI Y, WU H, 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.
［33］ 张航. 二硫代羧基化胺甲基聚丙烯酰胺去除水中铬和铜的性能和机理[D]. 兰州：兰州交通大学, 2023. ［ZHANG H. Performance and mechanism for removal of chromium and copper by dithiocarboxyl aminomethy-polyacrylamide[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.］
［34］ 王晓丽, 潘杨霞, 王宇扬, 等. 24-表油菜素内酯处理对采后‘阳丰’甜柿果实褐变和抗氧化酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 395−401. ［WANG X L, PAN Y X, WANG Y Y, et al. Effects of 24-epibrassinolide treatment on postharvest browning and antioxidant enzyme activity in ‘Youhou’ sweet persimmon fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 395−401.］
［35］ 罗玉琴, 马丽茹, 张巧玲, 等. 热水复合茶多酚处理对鲜切莴笋的褐变抑制效果[J]. 南昌大学学报(工科版), 2025, 47(1): 70−78. ［LUO Y Q, MA L R, ZHANG Q L, et al. The browning inhibition effect of hot water combined with tea polyphenolson fresh-cut lettuce[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2025, 47(1): 70−78.］
［36］ 李佩艳, 苏娇, 肖鑫鑫, 等. 草酸处理对采后银条褐变及能量代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 257−264. ［LI P Y, SU J, XIAO X X, et al. Effects of oxalic acid treatment on browning and energy metabolism of postharvest *Stachys flordana* Schuttl. ex Benth[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 257−264.］
［37］ 容浩钊, 涂聪, 谢带琴, 等. 静电场结合气调包装处理对两种荔枝冷藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 357−366. ［RONG H Z, TU C, XIE D Q, et al. Effect of electrostatic field synergetic modified atmosphere packaging treatment on the quality of two varieties of litchi during cold storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 357−366.］
［38］ 张菊, 边龙义, 韩静, 等. 褐变对黑枸杞抗氧化能力的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 206−217. ［ZHANG J, BIAN L Y, HAN J, et al. Effects of browning on the antioxidant capacity of black wolfberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 206−217.］
［39］ 孟创鸽, 傅虹飞, 周良付, 等. 菊苣中菊苣酸、绿原酸和木犀草苷的协同抗氧化作用[J]. 中国食品学报, 2017, 17(9): 41−47. ［MENG C G, FU H F, ZHOU L F, et al. Investigation of synergistic antioxidant effect of chicoric acid, chlorogenic acid and galuteolin from *Cichorium intybus* L[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(9): 41−47.］
［40］ 王泽童, 周才雪, 殷丽, 等. 蒙古栎壳提取物保鲜剂制备及其在鲜猪肉保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 379−390. ［WANG Z T, ZHOU C X, YIN L, et al. Preparation of *Quercus mongolica* shell extract preservative and its application in fresh pork preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 379−390.］
［41］ YAO T, ZENG X, TAO X, et al. Recent progress of MOF-based antibacterial hydrogels[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 487: 150641.
［42］ 王春元, 王印庚, 赵伟志, 等. 没食子酸对溶藻弧菌的抑菌活性及机理研究[J]. 渔业科学进展, 2025, 46(3): 212−221. ［WANG C Y, WANG Y G, ZHAO W Z, et al. Gallic acid bacteriostatic activity and mechanismagainst *Vibrio alginolyticus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(3): 212−221.］
［43］ CHENG X, HU E, LI H, et al. Bimetallic MOFs@PAN ordered nanofibrous membranes with antibacterial activity for air filtration and personal protective equipment[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(3): 116430.
［44］ 舒娟, 张雪研, 宋爽. 鲁甸青花椒精油对金黄色葡萄球菌的抑菌活性及机制研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 178−189. ［SHU J, ZHANG X Y, SONG S, et al. Study on the antibacterial activity and mechanism of Ludian Green Pepper (*Z. Schinifolium*) essential oils against *Staphylococcus Aureus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 178−189.］
［45］ MARRUFO-HERNÁNDEZ N A, NÁJERA H, GONZÁLEZ C F, et al. Polyphenol oxidase inactivation from apple juice by Al-based metal–organic frameworks: New anti-browning strategy in fruits and vegetables[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138178.