

碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇的保鲜效果

Effects of carbon quantum dot-chitosan coating on preservation of fresh-cut shiitake mushroom

杨娜 魏齐敏 杨卫灵 黄群

YANG Na WEI Qi-min YANG Wei-ling HUANG Qun

(贵州医科大学公共卫生与健康学院环境污染与疾病监控教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

(School of Public Health, the Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

摘要:目的:改善鲜切香菇的保鲜效果。方法:以火龙果皮和乙二胺为原料合成碳量子点,并表征其稳定性和毒性。以鲜切香菇为研究对象,分别使用 0.0, 1.5, 3.0, 4.5 mL/100 mL 的碳量子点—壳聚糖涂膜液(N-CDs/CH)进行保鲜处理后 4 ℃ 贮藏 10 d,其间每 24 h 测定其失重率、色差、可溶性固形物和多酚氧化酶等指标,以评价复合膜的保鲜效果。结果:合成的碳量子点荧光稳定性良好,外表面含有羟基、氨基等官能团,且无细胞毒性,具备典型碳量子点的特征。贮藏第 10 天,经 4.5 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的失重率为 3.31%,色度为 10.32,可溶性固形物含量为 4%,多酚氧化酶(PPO)活性为 104.65 U/(kg·s),各项指标均显著优于空白组及其他处理组($P < 0.05$)。结论:采用 4.5 mL/100 mL 的碳量子点—壳聚糖涂膜液处理可以有效抑制鲜切香菇的水分流失和多酚氧化酶活性,改善香菇色泽,提升保鲜效果。

关键词:碳量子点;香菇;壳聚糖;涂膜

Abstract: Objective: In order to improve freshness preservation quality of the fresh-cut shiitake mushroom. Methods: Carbon quantum dots were synthesized from dragon fruit peel and ethylenediamine, and characterized for stability and toxicity. Fresh-cut shiitake mushrooms were studied, and stored at 4 ℃ for 10 d after coating with 0.0, 1.5, 3.0 and 4.5 mL/100 mL carbon quantum dots-chitosan (N-CDs/CH) for preservation treatment. During the period of preservation, the weight loss, color difference, soluble solids and polyphenol oxidase were

measured every 24 h to evaluate the preservation effect of the composite films. Results: The synthesized N-CDs had the typical characteristics, which had good fluorescence stability, hydroxyl and amino groups on outer surface, and no cytotoxicity. After fresh-cut shiitake mushrooms were treated with different concentrations of N-CDs/CH until the 10th day of storage, 4.5 mL/100 mL N-CDs/CH coating group had weight loss of 3.31%, coloration of 10.32, soluble solids of 4%, and polyphenol oxidase (PPO) activity of 104.65 U/(kg·s), all of which were significantly better than the blank group and other treatment groups ($P < 0.05$). Conclusion: The preservation effect at the 4.5 mL/100 mL of N-CDs/CH coating was significantly better than that of blank and others ($P < 0.05$). N-CDs/CH coating inhibited water loss and PPO activity, improved color and enhanced the preservation quality of fresh-cut shiitake mushroom.

Keywords: carbon quantum dots; fresh-cut shiitake mushroom; chitosan; coating

香菇表面没有角质层,易受到微生物的破坏,导致水分流失,同时产生酶促褐变,与蔬菜相比保质期较短。现有关香菇贮藏保鲜的方法主要有低温保鲜^[1]、气调保鲜^[2]、辐照保鲜^[3]、涂膜保鲜^[4]等技术。据报道^[5],两种或两种以上保存方法的协同处理可以更好地保持香菇的品质。涂膜结合低温保鲜最为简单易行,且具有良好的阻湿阻气功能、防止有害微生物生长的特点。鲜切香菇作为一种净菜,需求量逐年增加,具有很大的市场发展潜力。鲜切蔬菜是具有一定生物活性的食品,要保证其新鲜品质,须控制有害微生物的生长繁殖以及蔬菜本身的生物活性和生物反应。然而,目前关于香菇保鲜的研究多集中于整菇的保鲜,关于鲜切香菇保鲜研究较少。

壳聚糖,具有较广泛的抗菌性能、可食用性、无毒性及可生物降解的特性,被广泛用于食品保鲜领域^[6-7]。

基金项目:贵州省大学生创新创业训练计划项目资助(编号: S202010660011)

作者简介:杨娜,女,贵州医科大学讲师,硕士。

通信作者:黄群(1977—),男,贵州医科大学教授,博士。

E-mail: huangqunlaoshi@126.com

收稿日期:2022-10-30 **改回日期:**2023-01-18

然而,壳聚糖是一种单组分抗菌剂,远远不能满足某些特殊条件的要求。碳量子点,具有良好的水溶性和稳定的光学性质,无毒性、不会引起环境、健康及生物毒性问题^[8],因易制备和原材料廉价、广泛,使其成为保鲜领域的研究热点^[9]。肖丹等^[10]研究表明,碳量子点可有效抑制芒果表面细菌和真菌的生长繁殖;也有报道^[6,11]表明,碳量子点对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌有显著的抑制作用。碳量子点可用于各种表面改性,使其涂覆的材料表面具有一定的特殊性能。目前关于碳量子点-壳聚糖涂膜对鲜切香菇保鲜的应用尚未见报道。

研究拟利用火龙果皮粉末合成碳量子点,将其与壳聚糖复合制备碳量子点-壳聚糖复合涂膜,对鲜切香菇涂膜处理,探究碳量子点-壳聚糖复合涂膜对鲜切香菇在冷藏期间失重率、色度、可溶性固形物、多酚氧化酶等生理生化指标的影响,以期寻求一种安全有效的鲜切香菇保鲜方式,解决鲜切香菇贮藏期间褐变、腐烂变质等问题维持鲜切香菇的新鲜品质。

1 材料与方 法

1.1 材料及仪器

新鲜香菇:挑选个体完整、无损伤,成熟度和大小一致、没有病虫害的新鲜香菇,市售;

火龙果皮粉末:新鲜火龙果皮经 60 ℃ 烘干后打粉,自制;

壳聚糖:食品级,河南多美姿生物科技有限公司;

乙二胺:分析纯,成都金山化学试剂有限公司;

无水乙醇、冰乙酸:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 主要仪器设备

酶标仪:1510 型,赛默飞世尔科技有限公司;

精密色差仪:WF32 型,深圳威福光电科技有限公司;

紫外分光光度计:UV-1700SPC 型,上海美析仪器有限公司;

荧光分光光度计:F97Pro 型,上海棱光技术有限公司;

二氧化碳培养箱:BB150 型,赛默飞世尔科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 碳量子点的制备 参考 Li 等^[12]的方法,并适当修改。准确称取 2 g 火龙果皮粉末,溶于 10 mL 蒸馏水中,搅拌均匀,向其中加入 0.318 mL 乙二胺,混合均匀后超声,将处理好的混合物于微波炉中,反应 5 min,待其冷却至常温后取出,添加 20 mL 蒸馏水,充分搅拌后 4 000 r/min 离心 10 min,取上层清液,用透析袋(500 Da)透析 2 d,收集透析后的液体,即为碳量子点溶液,置于 4 ℃ 环境下冷藏备用。

1.3.2 壳聚糖、碳量子点-壳聚糖复合膜的制备 参考 Fan 等^[9]的方法,并适当修改。称取 1.5 g 的壳聚糖粉末于装有 100 mL 1% 醋酸溶液的烧杯中,得到质量分数为 1.5% 的壳聚糖溶液,分别吸取 0.0, 1.5, 3.0, 4.5 mL 碳量子点溶液于 100.0, 98.5, 97.0, 95.5 mL 的 1.5% 壳聚糖溶液中,分别配制成 0.0, 1.5, 3.0, 4.5 mL/100 mL 的碳量子点-壳聚糖涂膜液,并进行一定时间的超声处理,使复合溶液充分混匀后,置于 4 ℃ 环境下冷藏备用。

1.3.3 样品处理 香菇用超纯水清洗 2 遍,在室温下晾干,用 75% 酒精消毒过的不锈钢刀和菜板切成片状,备用。将处理好的鲜切香菇浸泡在不同浓度的碳量子点-壳聚糖涂膜液中,2 min 后取出,于室温下晾干。将上述处理好的样品立即放入可食用包装袋中,全部样品在 4 ℃ 冰箱中冷藏 10 d,每 24 h 进行指标测定,每个样品均重复测定 3 次,取平均值。空白组用蒸馏水代替碳量子点-壳聚糖涂膜液处理鲜切香菇,其他步骤相同。

1.4 碳量子点表征与保鲜指标测定

1.4.1 碳量子点表征

(1) 稳定性:配制质量浓度为 0.1 g/mL 的碳量子点溶液。以超纯水为参比液,荧光光谱仪参数(扫描速度 1 000 nm/min,扫描间隔 1 nm,激发带和发射带宽均为 10 nm,增益值 650 V),于 1 cm 荧光池中测定。

(2) 红外光谱:通过傅立叶变换红外光谱仪测定。

(3) 细胞毒性:取每孔 100 μL 的含 HepG2 细胞的悬浮液,接种于 96 孔板中。在培养箱中预孵育板 12 h,弃去旧培养基,PBS 清洗 2 次。每孔加入 100 μL 不同浓度碳量子点及复合膜溶液。同时设空白组和对照组。空白组无细胞和 100 μL 无菌水;对照组则有细胞和 100 μL 无菌水。每个浓度和空白组重复 3 次,试验重复两次。染毒后的 96 孔板放入培养箱中孵育 24 h,向每个孔内加 10 μL CCK-8 溶液,在培养箱中孵育 30 min,使得 CCK-8 显色。酶标仪在波长 450 nm 处读取吸光值。按式(1)计算细胞存活率。

$$R_{CS} = \frac{A_s - A_b}{A_c - A_b} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_{CS} ——细胞存活率, %;

A_s ——测定组在 450 nm 下的吸光度值;

A_b ——空白组在 450 nm 下的吸光度值;

A_c ——对照组在 450 nm 下的吸光度值。

(4) 碳量子点-壳聚糖复合膜抑菌性测定:采用微量肉汤稀释法(酶标板)。用灭菌好的接种环挑取 3~5 个单菌落,接种于 4~5 mL 的 LB 营养肉汤中,37 ℃ 培养 2~6 h。用生理盐水校正至 0.5 麦氏比浊标准($1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$ CFU/mL)。将以上处理好的菌液经 LB 营养肉汤培养基 1:1 000 稀释后,向酶标板的孔中分别加

入 200 μL 培养基、1 μL 菌悬液、100 μL 不同浓度的碳量子点—壳聚糖复合膜溶液, 每组均设置空白组且进行 3 次重复试验。将处理好的 96 孔板于酶标仪中测定 $\text{OD}_{600\text{nm}}$, 记录数据, 再将该板密封好后置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱中培养 16~20 h 后, 再次测定 $\text{OD}_{600\text{nm}}$ 值。

1.4.2 保鲜指标测定

(1) 失重率: 采用重量法, 按式(2)计算失重率。

$$R_{\text{WL}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R_{WL} ——失重率, %;

m_1 ——样品贮藏前的质量, g;

m_2 ——样品贮藏后的质量, g。

(2) 色差(ΔE): 用精密色差仪测定, L^* 、 a^* 、 b^* 为样品的测量参数。每次使用色差计之前, 先用标准白板进行校正, 后选择 ΔE Hunter 作为测量的色差公式, 将容差设置为 2。将新鲜香菇的测量值作为标样, 每次测量样品时, 将其调出, 以便与样品进行比较。测试每组的样品, 每个样品读数 3 次, 对所得数据求取平均值。按式(3)计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

ΔE ——色差;

L_0^* 、 L^* ——新鲜香菇和待测样品的亮度;

a_0^* 、 a^* ——新鲜香菇和待测样品的绿—红值;

b_0^* 、 b^* ——新鲜香菇和待测样品的黄—蓝值。

(3) 可溶性固形物: 将每组香菇样品打碎, 5 000 r/min 离心 5 min, 收集上清液, 使用手持式折光仪测定, 每份样品测量 3 次。

(4) 多酚氧化酶(PPO): 参考 Fan 等^[9]的方法, 并适当修改。用分析天平分别精确称取 1 g 香菇样品于研钵

中, 加入 pH 为 7.5 的 5 mL 0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液, 并在冰浴条件下研磨成匀浆。以 5 000 r/min 离心 15 min, 收集上清液作为粗酶液。将 500 μL 粗酶液加入到 2.2 mL 1% 愈创木酚与 0.2 mL 1.5% H_2O_2 的混合溶液中, 将不加酶液的混合液作为空白组, 进行调零, 在酶标仪中测定其混合 $\text{OD}_{470\text{nm}}$ 值, 每隔 1 min 读数一次。以 1 min 内吸光度变化 0.01 为 1 个酶活性单位。

1.5 数据分析与处理

数据通过 SPSS 26 软件, 采用单因素方差分析(Duncan 检验)对均值进行两两比较, 置信区间为 95%。采用 Origin Pro 2021 软件对试验数据进行处理分析并作图。

2 结果与讨论

2.1 碳量子点的表征与碳量子点—壳聚糖复合膜的细胞毒性分析

如图 1(a)所示, 用 365 nm 紫外线持续照射 180 min, 其荧光强度无明显变化, 说明碳量子点溶液具有良好的耐光漂白性。在长期保存的情况下每隔 2 d 对其进行荧光强度的测定, 如图 1(b)所示, 连续 15 d 的荧光测定结果显示其荧光强度没有明显变化, 说明碳量子点溶液具有良好的荧光稳定性。

如图 2 所示, 在 3 287.14 cm^{-1} 处的吸收峰为 O—H 和 N—H 伸缩振动峰, 在 2 923.17 cm^{-1} 处的吸收峰为 C—H 伸缩振动峰, 在 1 604.68 cm^{-1} 处的吸收峰为 —N=N—伸缩振动峰, 在 1 416.74 cm^{-1} 处的吸收峰为 C—N 伸缩振动峰, 在 1 322.60 cm^{-1} 处的吸收峰为 C—N 伸缩振动峰, 在 1 017.82 cm^{-1} 处的吸收峰为 C—O 伸缩振动峰, 表明合成的碳量子点外表面含有羟基、氨基等官能团, 而这些官能团为亲水性基团, 极大地增加了碳量子点的溶水性和其在水中的稳定性, 使其在水中具有高度的分散性和稳定性, 也是其具备稳定的荧光的原因。

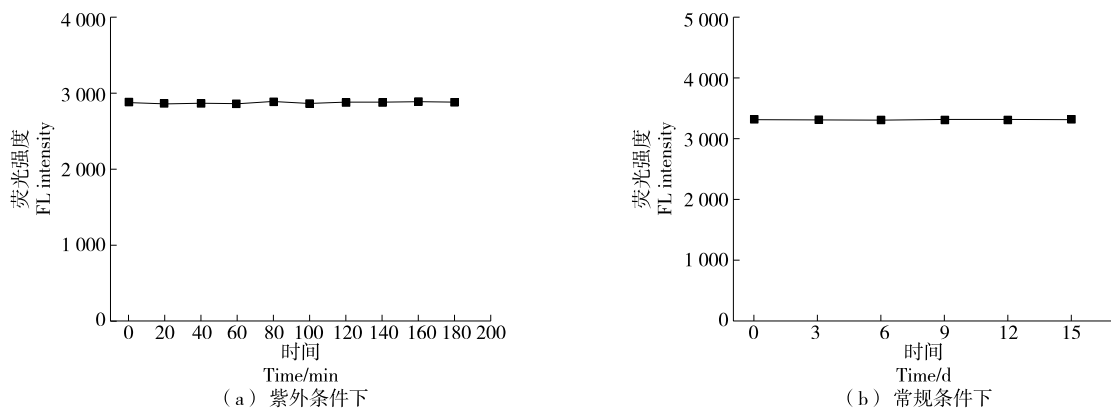


图 1 碳量子点的荧光稳定性

Figure 1 Fluorescence stability of carbon quantum dots

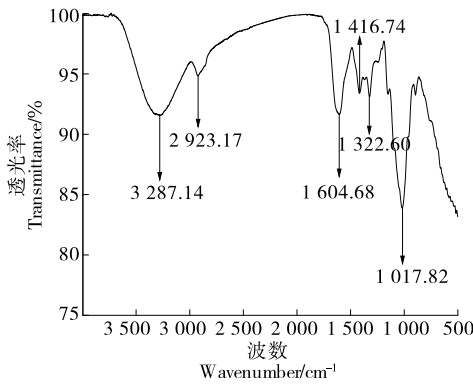


图 2 碳量子点的傅立叶红外光谱图

Figure 2 FTIR spectrum of carbon quantum dot

如图 3 所示,在相对较高的质量浓度(0.1 g/mL)下,几乎全部的 HepG2 细胞均存活下来,表明合成的碳量子点的细胞毒性极低,说明碳量子点浓度不会对生物细胞造成伤害,碳量子点可以用于食品保鲜。

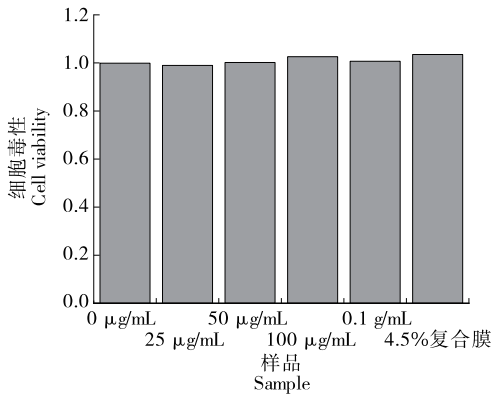


图 3 碳量子点对 HepG2 细胞的细胞毒性

Figure 3 Cytotoxicity effect of carbon quantum dot on HepG2 cells

2.2 碳量子点-壳聚糖复合膜的抑菌性分析

$\Delta OD_{600\text{ nm}}$ 值可以反映菌种的生长情况,值越大,说明菌种繁殖得越好。由表 1 可知,随着碳量子点-壳聚糖复合膜中碳量子点浓度的不断增加,大肠杆菌和金黄色葡萄球菌生长速度逐渐减慢,复合膜的抑菌性增加。各浓度组的金黄色葡萄球菌的生长趋势小于大肠杆菌,说明碳量子点浓度高的复合膜对金黄色葡萄球菌有较好的抑菌性。

2.3 保鲜效果

2.3.1 碳量子点-壳聚糖涂膜对鲜切香菇冷藏期间失重率的影响 由于贮藏条件不良或贮藏时间过长,鲜菇会发生一系列生理生化反应,导致其水分散失、重量减少,同时会滋生大量微生物,进而影响其口感、风味及降低营

表 1 碳量子点添加量对碳量子点-壳聚糖涂膜抑菌效果的影响[†]

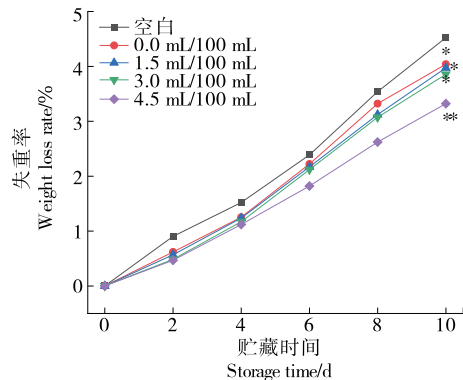
Table 1 Bacterial inhibition of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* by carbon quantum dot/chitosan coated films

碳量子点溶液 用量/mL	$\Delta OD_{600\text{ nm}}$	
	大肠杆菌	金黄色葡萄球菌
0.0	0.475±0.005 ^a	0.166±0.004 ^a
1.5	0.144±0.009 ^a	0.160±0.004 ^a
3.0	0.128±0.000 ^b	0.139±0.004 ^b
4.5	0.106±0.002 ^c	0.113±0.001 ^c

[†] 小写字母不同代表差异显著($P < 0.05$)。

养价值^[13]。由图 4 可知,试验组和空白组的失重率均随贮藏时间的延长而不断增大。在 10 d 的贮藏期内,与空白组相比,试验组的失重率明显降低。贮藏第 10 天,经 0.0,1.5,3.0,4.5 mL/100 mL 碳量子点-壳聚糖涂膜液处理的鲜切香菇的失重率分别为 4.03%,3.97%,3.85%,3.31%,空白样品的失重率为 4.51%,明显高于试验组($P < 0.05$)。其中,4.5 mL/100 mL 碳量子点-壳聚糖涂膜液处理的失重率较其他处理组的显著降低($P < 0.05$)。这是由于复合膜在样品表面形成了一层致密的膜,减缓了香菇内部的生理生化及呼吸作用,阻止了样品中的水分流动,从而减少了水分的流失。复合涂膜剂能显著降低香菇的失重率,此结果与 Fan 等^[9]的研究结果一致。

2.3.2 碳量子点-壳聚糖涂膜对鲜切香菇冷藏期间色差(ΔE)的影响 香菇经鲜切处理后会受到一定程度的机械损伤,使其原有生理平衡遭到破坏、水分蒸发、营养物质大量流失,增加了香菇中基质成分与空气的接触,也大大增加了香菇切面发生褐变的概率。由图 5 可知,冷藏期间,鲜切香菇的色差值随冷藏时间的延长而持续增加,



* 表示与空白具有显著性差异($P < 0.05$)

图 4 碳量子点-壳聚糖涂膜对鲜切香菇贮藏期间失重率的影响

Figure 4 Effects of different concentrations of CDs-chitosan coating on the weight loss rate to fresh-cut shiitake mushrooms during storage

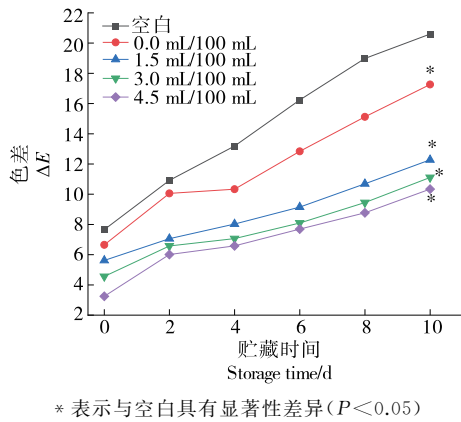


图 5 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇贮藏期间色差的影响

Figure 5 Effects of different concentrations of carbon quantum dot-chitosan composite coating film on color difference of fresh-cut shiitake mushroom during storage

空白样品的色差值在整个贮藏期间均高于各试验组 ($P < 0.05$), 而经 4.5 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的样品色差值变化最小且明显优于 0.0 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的 ($P < 0.05$), 表明碳量子点对鲜切香菇的保鲜起到了明显的增效作用。这是因为碳量子点与壳聚糖复合在样品表面形成了一层致密的膜, 阻断了样品和外界氧气的接触面积, 并降低鲜切样品表面与颜色变化相关的酶的活性, 从而减缓了色泽的变化^[14]。

2.3.3 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇冷藏期间可溶性固形物含量的影响 由图 6 可知, 鲜切香菇样品的可溶性固形物含量随冷藏时间的延长而不断下降, 表明鲜切香菇正在衰老。冷藏期间, 经 1.5、3.0、4.5 mL/100 mL

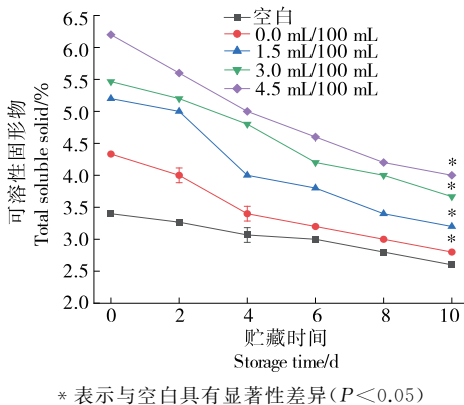


图 6 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇贮藏期间可溶性固形物的影响

Figure 6 Effects of different concentrations of carbon quantum dot-chitosan composite coating film on soluble solids of fresh-cut shiitake mushrooms during storage

碳量子点—壳聚糖涂膜液处理样品的可溶性固形物含量明显高于空白组和 0.0 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的 ($P < 0.05$)。这可能是由于涂膜中的碳量子点延缓了可溶性固形物的溶出。冷藏第 10 天, 4.5 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的香菇样品中可溶性固形物含量显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。这是由于复合膜在样品表面形成了一层致密的膜, 抑制了香菇贮藏期间微生物生长和呼吸代谢速率, 从而减缓可溶性固形物的降低。复合膜可有效降低香菇在贮藏期间的总可溶性固形物的损失, 此结果与 Fan 等^[9]的研究结果一致。

2.3.4 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇冷藏期间 PPO 活性的影响 多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 是一类以铜为辅基的酶, 并能够催化许多酚类物质氧化产生的醌类化合物进一步反应形成褐色、棕色或黑色的聚合物。醌类化合物最终会导致果蔬出现不同程度的酶促褐变^[15]。多种果蔬在不断成熟过程中、在采摘后的贮藏和加工处理过程中, 其出现的组织褐变和组织中的多酚氧化酶的活性有着密切的关系。由图 7 可知, 随着冷藏时间的延长, 鲜切香菇样品的 PPO 活性先增加后降低。整个贮藏期间, 试验组鲜切香菇的 PPO 活性明显低于空白组的, 表明碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇的 PPO 活性都有不同程度的抑制作用。贮藏第 6 天, 空白组和试验组的鲜切香菇的 PPO 活性均达到最大值, 第 10 天时, 4.5 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理的鲜切香菇的 PPO 活性相比于其他处理的低, 且差异具有显著性 ($P < 0.05$)。表明 4.5 mL/100 mL 碳量子点—壳聚糖涂膜液处理能更加有效地抑制香菇的 PPO 活性。这可能是由于在壳聚糖中添加碳量子点形成的复合成膜更致密, 阻断了香菇和外界氧气的接触, 从而降低了 PPO 活性^[16-17]。

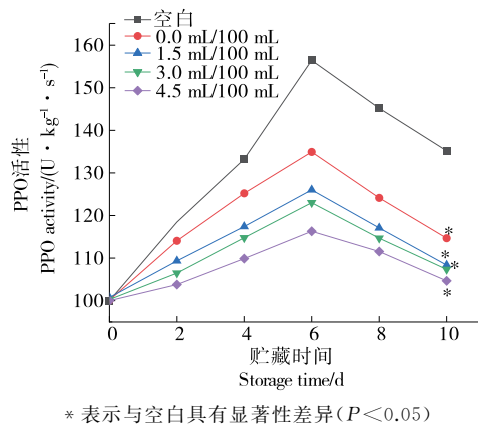


图 7 碳量子点—壳聚糖涂膜对鲜切香菇贮藏期间 PPO 活性的影响

Figure 7 Effects of different concentrations of carbon quantum dot-chitosan coating on PPO activity of fresh-cut shiitake mushroom during storage

3 结论

研究以成本低、环境友好、安全的火龙果皮粉末为主要原料制备的碳量子点荧光强度稳定,其外表面含有羧基、氨基等亲水性基团,在水中具有高度的分散性和稳定性,且无细胞毒性。将制备的碳量子点与壳聚糖复合制备成不同浓度碳量子点-壳聚糖纳米复合涂膜,随着该复合涂膜中碳量子点浓度的增加,处于对数生长期的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长速度均降低,而且高浓度的碳量子点复合膜抑菌效果优于壳聚糖单独处理组的,表明复合膜具有良好的抑菌效果。将不同浓度的碳量子点溶液与壳聚糖制成的复合膜用于鲜切香菇的保鲜,与空白组和仅有壳聚糖处理组相比,添加碳量子点的4.5 mL/100 mL 碳量子点-壳聚糖涂膜液处理的鲜切香菇保鲜效果最佳,能较好地抑制失重率、色度、酶活性的上升及可溶性固形物含量的下降,并抑制多酚氧化酶的活性,从而减缓香菇在冷藏期间褐变程度。碳量子点-壳聚糖复合膜对鲜切香菇的保鲜机理尚不完全清楚,碳量子点-壳聚糖复合膜对于其他鲜切果蔬是否具有保鲜作用以及其保鲜机理也有待进一步研究。

参考文献

- [1] SUBRAMANIAM S, JIAO S, ZHANG Z, et al. Impact of post-harvest processing or thermal dehydration on physiochemical, nutritional and sensory quality of shiitake mushrooms [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(3): 2 560-2 595.
- [2] ZHANG S L, FANG X J, WU W J, et al. Effects of negative air ions treatment on the quality of fresh shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131200.
- [3] SHI D F, YIN C M, FAN X Z, et al. Effects of ultrasound and gamma irradiation on quality maintenance of fresh *Lentinula edodes* during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131478.
- [4] GUO Y, CHEN X F, GONG P, et al. Effect of shiitake mushrooms polysaccharide and chitosan coating on softening and browning of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during postharvest storage [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 218: 816-827.
- [5] ABDELSHAFY A M, LUO Z, BELWAL T, et al. A comprehensive review on preservation of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Techniques, research advances and influence on quality traits [J]. *Food Reviews International*, 2021, 502: 1-34.
- [6] SUN Y N, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent development of carbon quantum dots: Biological toxicity, antibacterial properties and application in foods [J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(7): 1 513-1 532.
- [7] DUAN J L, ZHANG S Y. Application of chitosan based coating in fruit and vegetable preservation: A review [J]. *Food Processing & Technology*, 2013, 4(5): 227.
- [8] SHAO X F, TU K, TU S, et al. A combination of heat treatment and chitosan coating delays ripening and reduces decay in "Gala" apple fruit [J]. *Journal of Food Quality*, 2012, 35(2): 83-92.
- [9] FAN K, ZHANG M, FAN D, et al. Effect of carbon dots with chitosan coating on microorganisms and storage quality of modified-atmosphere-packaged fresh-cut cucumber [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(13): 6 032-6 041.
- [10] 肖丹, 普红梅, 田浩, 等. 碳量子点/壳聚糖涂膜剂在芒果保鲜中的应用 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(22): 130-135.
- [10] XIAO D, PU H M, TIAN H, et al. Application of carbon dots-chitosan coating in preservation of mango [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(22): 130-135.
- [11] SAFARDOUST H H, SALAVATI N M, AMIRI O, et al. Green synthesis, characterization and antimicrobial activity of carbon quantum dots-decorated ZnO nanoparticles [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(4): 5 187-5 197.
- [12] LI B L, LI Y S, GAO X F. Fluorescence quenching capillary analysis for determining trace-level nitrite in food based on the citric acid/ethylenediamine nanodots/nitrite reaction [J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 162-169.
- [13] 王艳, 汤卫东, 张亮. 壳聚糖+植酸复合涂膜对鲜切哈密瓜保鲜效果的影响 [J]. *食品科技*, 2022, 47(4): 48-53.
- [13] WANG Y, TANG W D, ZHANG L. Preservation effect of natural film with chitosan combining phytic acids on fresh-cutting cantaloupe [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(4): 48-53.
- [14] 田茂华, 严琳, 刘一飞, 等. 负载碳量子点的壳聚糖/谷胱氨酸复合膜在鲜切黄瓜保鲜中的应用 [J]. *现代食品*, 2022, 28(12): 103-106.
- [14] TIAN M H, YAN L, LIU Y F, et al. Effect of chitosan/gluten protein composite film loaded with carbon dots in fresh-cut cucumber [J]. *Modern Food*, 2022, 28(12): 103-106.
- [15] 周亨乐, 王富海, 易俊洁, 等. 化学抑制剂对果蔬食品多酚氧化酶性质影响的研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 253-260.
- [15] ZHOU H L, WANG F H, YI J J, et al. Research progress on the effect of chemical inhibitors on the properties of polyphenol oxidase in fruits and vegetables [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 253-260.
- [16] 李宏, 李秋兰, 于丽娟, 等. 生菜多酚氧化酶的酶活特性及碳点对其抑制作用 [J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(12): 54-60.
- [16] LI H, LI Q L, YU L J, et al. Activity of polyphenol oxidase from lettuce and the inhibitory effect of carbon dots [J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(12): 54-60.
- [17] 齐懿涵, 周季欣, 范媛媛, 等. 壳聚糖复合涂膜对冷藏虾蛄保鲜效果的影响 [J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 116-119.
- [17] QI Y H, ZHOU J X, FAN Y Y, et al. Effects of chitosan composite coating on the quality of mantis shrimp during refrigerated storage [J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(10): 116-119.