

可食性复合涂膜对滑子菇采后贮藏品质的影响

郭瑞¹, 朱丹², 宋静雅¹, 李文香¹, 程凡升¹

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266109) (2. 青岛农业大学生命科学学院, 山东青岛 266109)

摘要: 研究了复合涂膜处理对滑子菇保鲜效果的影响。以海藻酸钠为成膜剂, 加入百里香精油、乳酸链球菌素(nisin)和 L-半胱氨酸等制成可食性复合涂膜。采后滑子菇分别进行复合涂膜处理, 蒸馏水作为对照; 复合涂膜后接病原菌处理, 不接菌作为对照, 室温放置, 定期测定滑子菇部分指标的变化。结果表明: 复合涂膜可使过氧化物酶(POD)活力峰值延缓两天出现, 降低苯丙氨酸解氨酶(PAL)活力下降速度, 提高子实体内氧化酶活力, 降低滑子菇可溶性蛋白质下降的速度, 抑制丙二醛(MDA)含量的增加, 延缓类黄酮和总酚的积累。说明复合涂膜可有效延缓菇体衰老, 保留更多营养价值, 保持菇体品质。贮藏结束时, 复合涂膜组滑子菇菌落总数仅为 2.82×10^4 CFU/g, 对照组为 22.82×10^4 CFU/g, 说明复合涂膜可以抵御微生物的入侵, 减少滑子菇腐败、染病的可能性。

关键词: 滑子菇; 复合涂膜; 保鲜; 病害

文章编号: 1673-9078(2018)02-149-156

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.2.024

Effect of Edible Composite Coating Treatment on Postharvest Preservation Quality of *Pholiota Nameko*

GUO Rui¹, ZHU Dan², SONG Jing-ya¹, LI Wen-xiang¹, CHENG Fan-sheng¹

(1.College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

(2.College of Life Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Effects of edible composite coating on the preservation quality of *pholiota nameko* during refrigeration storage were investigated. The preservation coating experiment was prepared using sodium alginate as the film-forming agent, adding thyme essential oil, nisin, L-cysteine and coalescing agents. The physiological and biochemical changes of the mushroom were studied after treatment with composite coating. The results obtained are as follows: the composite coating could effectively delay the appearance of peroxidase(POD) activity peak, delay the decrease of the phenylalanine ammonialyase (PAL) activity, enhance the oxidation activity of oxidase, reduce the decrease of soluble protein and inhibit the increase of MDA content. In addition, composite coating also could delay the accumulation of flavonoids and total phenol. The results indicated that composite coating could effectively delay the mushroom body aging, retain more nutritional value and keep the mushroom body quality. At the end of the storage period, the total colonies number of the composite coating group was only 2.82×10^4 CFU/g, while 22.82×10^4 CFU/g of the control group which indicated that composite coating treatment could resist microbial invasion, reduce the possibility of corruption and infecting diseases in nameko.

Key words: *Pholiota nameko*; composite coating; fresh-keeping; disease-resistant

滑子菇 (*Pholiota nameko*), 又名珍珠菇、滑菇、光帽鳞伞, 属担子菌纲、伞菌目、球盖菇科、环锈伞属^[1]。滑子菇属于珍稀品种, 原产于日本^[2], 是联合国粮农组织(FAO)向发展中国家推荐栽培的食用菌之一^[3]。食用菌采后其生命活动仍继续进行, 随着贮藏时间的延长, 氧化-还原平衡遭受破坏, 氧化产物积累, 造成

收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301438、31501331); 山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2013SW034); 山东省现代农业产业技术体系食用菌创新团队建设专项基金项目(SDAIT-07-07)

作者简介: 郭瑞(1992-), 女, 研究生, 研究方向: 食品生物技术

通讯作者: 程凡升(1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术

衰老和变色, 外观品质下降。此外, 食用菌采后易出现软化、老化、细菌或病毒感染而腐烂等品质衰败现象, 影响贮运和消费^[4]。食用菌子实体的细菌性斑点病、滴水病和干腐病等都是由假单胞菌属引起的, 荧光假单胞菌是食用菌细菌性腐烂病的主要病原菌^[5], 染菌后, 子实体菌盖或菌柄出现淡黄色水渍状病斑, 腐烂后散发出难闻的恶臭气味, 最终失去经济价值不能食用^[5,6]。因此, 选择合适、实用的采后处理方法对减少滑子菇鲜菇损失, 抵御病原菌侵染, 保持良好商品性状和营养价值具有重要的意义。

以天然植物提取物作为保鲜剂与传统的涂膜保鲜处理相结合, 研制具有抗菌或抗氧化等特征的复合涂

膜是近几年果蔬保鲜的研究热门^[7-12]。涂膜保鲜是果蔬贮藏的重要辅助技术,根据微气调理论,将具有成膜性的物质通过浸渍、喷洒等方法涂敷在果蔬的表面,风干后形成一种无色透明的半透膜,起到延长果蔬货架期的作用^[7]。赵梅等^[10]发现纳米壳聚糖涂膜对平菇保鲜具有积极影响。张沙沙等^[11]采用黑虎掌菌提取液-壳聚糖-竹荪提取液复合涂膜双孢菇可达到延缓衰老的目的。百里香精油、乳链菌肽(nisin)等作为天然、高效的抗菌剂,具有较广阔的应用前景^[12-14]。百里香精油作为一种高效的植物源抑菌药物,已被证明具有广谱的抑菌性能^[12,13]。Thierry R 等^[15]研究表明,百里香精油对有害疣孢霉菌丝的生长具有抑制作用。李伟丽等^[14]的实验结果显示 nisin 对腐败醋中分离得到的微生物菌株均具有明显的抑菌或杀菌活性。

本文将海藻酸钠、L-半胱氨酸和 nisin 复配成可食性复合涂膜,研究了此复合涂膜对滑子菇的保鲜和抗病效果,旨在探索新型、高效、安全的滑子菇保鲜方法,为生产上应用复合涂膜保持采后滑子菇品质、延长货架期提供适用技术和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

滑子菇购于城阳果蔬批发市场,选取新鲜、成熟度一致、大小适中、无机械伤、无病虫害及霉变的滑子菇作为试验材料。菌种为本团队从携带病斑、腐烂发黄的平菇中筛选出的一株病害菌株荧光假单胞菌 *Pseudomonas Fluorescens*-YL(数据未发表)。

L-半胱氨酸、百里香精油、nisin、假单胞 CFC 选择性培养基和假单胞菌 CFC 选择性培养基添加剂等购自国药集团化学试剂有限公司;氯化钙等试剂为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

AR1140 电子分析天平,购于美国奥豪斯国际贸易有限公司;UV757CRT 紫外分光光度计 OG02 型高压蒸汽灭菌锅,购于新华医疗器械有限公司;SW-CJ-2D 无菌超净工作台,购于青岛正恒实验设备有限公司;FUMA QYC-200 变频摇床,购于上海福玛试验设备有限公司等。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将滑子菇样品随机分成四组,标记为 A、B、C 和 D,分别做如下处理:A 组针刺后,用毛笔将 1 mL

无菌水均匀涂抹在菇体表面;B 组针刺后,用毛笔将 1 mL 菌悬液均匀涂抹在菇体表面;C 组复合涂膜后,针刺,用毛笔将 1 mL 无菌水均匀涂抹在菇体表面;D 组复合涂膜后,针刺,用毛笔将 1 mL 菌悬液均匀涂抹在菇体表面。常温储存 10 d,测定相关指标。所用毛笔等器具均干净无菌。

1.3.2 菌液

取保存在-80 °C 的甘油菌划线活化,挑取单菌落于假单胞 CFC 选择性培养基,30 °C,200 r/min 培养 24 h,用无菌水稀释至 $10^8 \sim 10^9$ CFU/mL,备用。

1.3.3 可食性复合涂膜

称取 0.5 g 海藻酸钠,溶于 100 mL 蒸馏水中,边水浴加热(55 °C~60 °C)边搅拌至海藻酸钠呈透明、无颗粒状,完全溶解,静置脱气。冷却后加入 1% 的甘油,1% 百里香精油,0.3 mg/kg L-半胱氨酸以及 40 mg/g nisin,将滑子菇浸入涂膜液中,30 s 后投入 5% 氯化钙溶液,交联 2 min,自然风干。

1.3.4 指标测定方法

参照崔世瑞等^[16]的方法测定可溶性蛋白质含量;采用愈创木酚氧化法^[17]测定 POD(过氧化物酶)活力;参照周巧丽^[18]的方法测定总酚、类黄酮含量;采用可见分光光度计法^[3]测定 PAL(苯丙氨酸酶)活力;采用分光光度计法^[19]测定 MDA(丙二醛)含量。所有指标检测均设置 3 个平行。

1.3.5 菌落总数测定

菌落总数测定参照 GB 4789.2-2010《食品卫生微生物学检验:菌落总数测定》的方法^[20]。

1.3.6 数据统计分析

试验数据为 3 次重复的平均值和标准差,采用 SPSS 软件进行差异显著性分析,采用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 复合涂膜对滑子菇体内部分酶活力的影响

2.1.1 复合涂膜对滑子菇 POD 活力的影响

过氧化物酶(POD)是一种氧化还原酶,在果蔬中可表现为一种衰老酶,其活性的变化可作为果蔬成熟和衰老的指标之一^[21]。有研究表明,在子实体衰老初期,POD 表现出保护作用,在维持组织中活性氧代谢平衡过程中能清除过氧化氢和脂类氢过氧化物;而在逆境或者衰老后期,表现出伤害效应,降低滑子菇耐储性^[21,22],在过氧化氢存在下,催化酚类、类黄酮

的氧化和聚合而导致组织褐变^[23]。

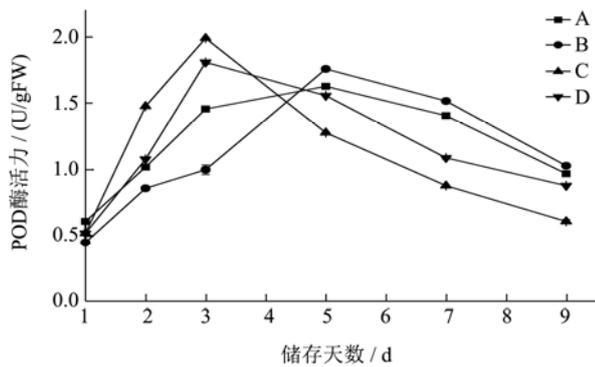


图1 滑子菇贮藏过程中 POD 酶活力的变化

Fig.1 The changes of the POD activity of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注: A 表示涂无菌水处理; B 表示涂菌液处理; C 表示复合涂膜后涂无菌水处理; D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

由图1可知, POD 活性在贮藏前期呈上升趋势, 达到一定值后开始下降。在常温贮藏过程中, 复合涂膜处理的 C、D 两组在 5 d, 未复合涂膜处理的 A、B 两组在 3 d 时 POD 活力达到峰值后逐渐降低; 说明复合涂膜处理可明显推迟 POD 活力高峰的出现。本实验结果与张荣飞等学者研究结果相似。张荣飞^[24]发现纳米 SiO₂ 复合膜处理双孢蘑菇后 POD 活性峰值延缓 3 d 出现, 实验结果表明复合涂膜处理能更有效的抑制双孢蘑菇在贮藏中的酶促作用, 从而达到保鲜目的。

在贮藏前期, C 组 POD 活力明显高于 A 组, 说明复合涂膜处理有利于滑子菇达到更高的 POD 活力, 在维持组织中活性氧代谢平衡过程中表现出更好的清除过氧化氢和脂类氢过氧化物能力, 从而延缓衰老; 在贮藏后期, C 组 POD 活力显著低于 A 组, 说明复合涂膜有利于抑制滑子菇的 POD 活力, 催化酚类、类黄酮的氧化和聚合而导致组织褐变, 降低 POD 对菇体的伤害效应, 更好地维持菇体品质。对于接入病原菌荧光假单胞菌的 B、D 两组也有相同的发现, 说明复合涂膜处理的滑子菇, 即使遭遇病原菌的侵染, 也可以在一定程度上延缓衰老和菇体品质下降。

植物体内的抗氧化酶系主要还包括超氧化物歧化酶 SOD 和过氧化氢酶 CAT, 共同维持组织中活性氧代谢平衡^[23], 二者活力变化结果与 POD 相似。在清除 O²⁻ 和 H₂O₂ 防止膜过氧化过程中, SOD 是抵抗氧化损伤的第一步, CAT 能催化积累的过氧化氢为 O₂ 和 H₂O, 减少氧化损伤引起的损伤。C 组的 SOD 活力在 5 d 达到峰值 21.20 U/g FW, 对照组在 3 d 达到峰值 10.67 U/g FW; C 组的 CAT 活力在 5 d 达到峰值 210.70 U/mg FW, 对照组在 3 d 达到峰值 172.31 U/mg FW(数据未发表); 说明复合涂膜处理的滑子菇体内抗氧化酶

活力更高, 高峰出现更晚。

2.1.2 复合涂膜处理对滑子菇 PAL 活力的影响

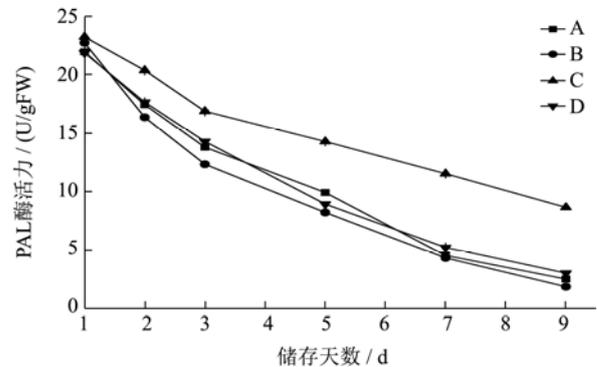


图2 滑子菇贮藏过程中 PAL 活力的变化

Fig.2 The changes of the PAL activity of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注: A 表示涂无菌水处理; B 表示涂菌液处理; C 表示复合涂膜后涂无菌水处理; D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 是连接生物初级代谢和苯丙烷类代谢、催化苯丙烷类代谢第一步反应的酶; 植保素是植物受病原菌侵染或寒冷、外伤胁迫而产生的一类低分子量抗微生物的化合物, PAL 活性可以作为植物抗逆境能力的一个生理指标^[25], 其生成量与 PAL 活性呈正相关关系^[26]。

由图2可知, 滑子菇 PAL 活力随贮藏时间延长均逐渐下降, A、B 和 D 组滑子菇 PAL 活力变化趋势和含量相似, C 组 PAL 活力下降速度最慢且在整个贮藏期间活力显著高于其他三组, 贮藏结束时, PAL 活力约为 8.75 U/g FW, 是 A 组的 3.50 倍, 说明复合涂膜处理有利于滑子菇的 PAL 活力维持在较高水平, 具有更好的抗逆性, 从而有利于抵抗外伤胁迫和阻止病原菌的侵入, 保持菇体品质。对于复合涂膜后接病原菌的 D 组, 在整个贮藏期间, PAL 活力均略高于 B 组, 不显著, 说明复合涂膜处理对滑子菇抵御病害也有一定保护作用。

2.2 复合涂膜对滑子菇可溶性蛋白质和丙二醛含量的影响

2.2.1 复合涂膜对滑子菇可溶性蛋白质含量的影响

滑子菇采收后消耗体内的糖类与蛋白质维持生命活动, 随着储存时间的延长, 不断消耗的蛋白质成为主要营养来源, 可溶性蛋白质含量的降低是滑子菇子实体衰老的重要指标, 可溶性蛋白质的含量不仅是菇体品质和营养的重要评价指标之一, 也反映出滑子菇

子实体衰老的程度^[27,28]。

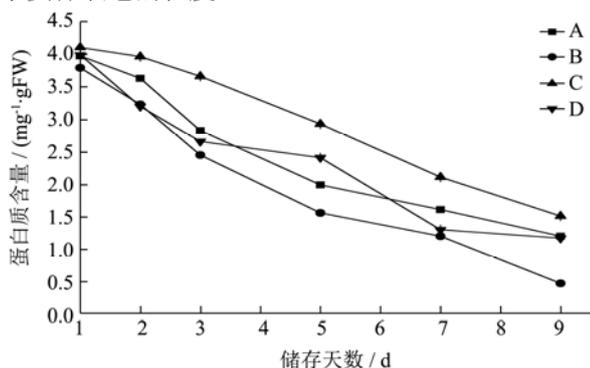


图3 滑子菇贮藏过程中可溶性蛋白含量的变化

Fig.3 The changes of the soluble protein content of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注: A 表示涂无菌水处理; B 表示涂菌液处理; C 表示复合涂膜后涂无菌水处理; D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

由图3可知,滑子菇可溶性蛋白含量随贮藏时间延长均逐渐下降。其中, C 组蛋白质含量下降趋势较为平缓,变化幅度最小,说明复合涂膜处理可更好地维持菇体可溶性蛋白质的含量,对滑子菇的衰老有延缓作用; D 组可溶性蛋白质含量下降速度最快,变化幅度最大,最终含量最低且明显低于其他组,这可能是因为遭受病害侵袭,菌液及菌体的代谢产物影响了滑子菇的代谢导致菇体衰老,可溶性蛋白质含量降低,破坏了菇体品质。D 组蛋白质含量略高于 B 组,说明未复合涂膜处理的滑子菇遭受了更为严重的病害侵袭,复合涂膜具有一定的抗病效果,但效果不显著。

2.2.2 复合涂膜对滑子菇丙二醛含量的影响

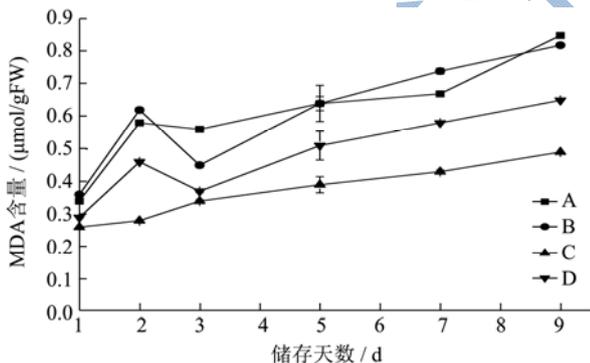


图4 滑子菇贮藏过程中MDA含量的变化

Fig.4 The changes of the MDA content of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注: A 表示涂无菌水处理; B 表示涂菌液处理; C 表示复合涂膜后涂无菌水处理; D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

菇体的衰老与细胞质膜相对透性密切相关,衰老过程中产生的大量的活性氧自由基会直接或者间接启动膜的过氧化作用,导致膜的损伤和破坏^[29,30],过氧化程度越高,细胞膜受损害程度越高,微生物入侵

的可能性越大。MDA 作为膜脂过氧化作用的最终产物,其含量可以反映出滑子菇子实体受伤害的程度。同时,MDA 具有较强的交联性质,可以使膜蛋白发生聚合,降低细胞膜流动性,进一步造成膜系统的损害而加速菇体自溶、衰老^[29]。

由图4可知,各组滑子菇的MDA含量在贮藏期间总体呈上升趋势,未复合涂膜的A、B两组MDA含量的增加速度快,说明膜脂过氧化快,果实逐渐衰老。复合涂膜处理的C、D两组MDA的含量增幅小,增加速度慢,说明膜脂过氧化较为缓慢。在贮藏结束时,A组样品MDA含量是原来的2.50倍,C组滑子菇的MDA含量仅为原来的1.81倍且整个贮藏期间均显著低于对照组A,说明复合涂膜处理对滑子菇菇体中MDA的积累可起到抑制作用,可有效减缓细胞的脂膜过氧化程度,降低微生物入侵的可能性,保持菇体品质,延缓菇体衰老。

对于接病原菌处理的滑子菇,结果类似,B和D组样品MDA含量分别是原来的2.25、2.21倍,D组MDA含量在整个贮藏期间均低于B组,说明复合涂膜后的滑子菇,在贮藏期间遭受病原菌侵害时,膜脂的过氧化作用更低,细胞膜受损害程度更低,可降低微生物入侵的可能性,在一定程度上可提高滑子菇抵御病害的能力。

2.3 复合涂膜对滑子菇总酚和类黄酮含量的影响

影响

2.3.1 复合涂膜处理对滑子菇总酚含量的影响

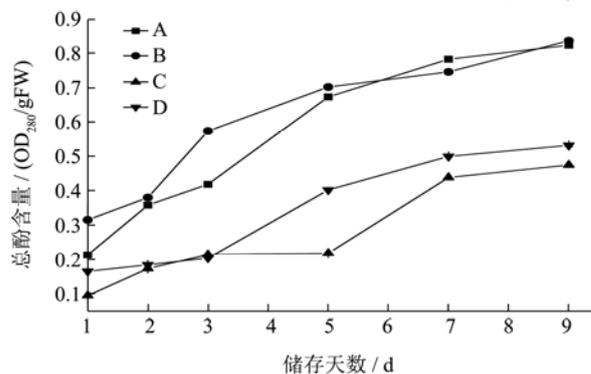


图5 滑子菇贮藏过程中总酚含量的变化

Fig.5 The changes of the total phenolic content of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注: A 表示涂无菌水处理; B 表示涂菌液处理; C 表示复合涂膜后涂无菌水处理; D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

果蔬采后褐变可归纳为酶促褐变和非酶褐变两大类^[30],褐变现象会导致菇体外观品质降低。酶促褐变是由多酚氧化酶作用于酚类物质底物而引起的,果实

褐变程度与其组织内部总酚含量密切相关。同时，酚类物质与果蔬的色泽、品质及成熟衰老也密切相关[29,30]。

由图 5 可知，各处理组滑子菇总酚含量呈上升趋势，这可能是由于随着贮藏时间的延长，滑子菇子实体受到环境的胁迫而引起组织内产生更多酚类物质，酚类物质可以参与组织的愈伤过程以及增强子实体对不良环境的抗逆性[29]。

酚类物质也是酶促褐变的重要底物，在多酚氧化酶 PPO 的催化下氧化为醌，醌进一步聚合形成深色物质，从而影响滑子菇的外观质量、风味和营养品质等。Aquino-Bolan 等[31]认为酚类物质积累会影响褐变程度，YE[32]等的实验结果表明较低的总酚含量和较低的褐变程度具有相关性。

未复合涂膜的 A、B 两组总酚含量的增幅大，增加速度快；复合涂膜处理的 C、D 两组总酚含量的增幅较小。在贮藏期间，对照组 A 的总酚含量始终处于较高水平，显著高于复合涂膜组 ($p < 0.05$)；说明复合涂膜的滑子菇酚类物质积累程度较低，更不利于酶促褐变的发生。对照组 A 的 PPO 活力在 5 d 达到高峰 18.26 U/g FW，C 组的 PPO 活力在 7 d 达到高峰 14.13 U/g FW 后逐渐下降且在整个贮藏期间均低于对照组（数据未发表），说明滑子菇经复合涂膜处理后，PPO 活力受到抑制，高峰的出现延缓了 3 d，有利于延缓酶促褐变高峰的发生。综合分析总酚含量和 PPO 活力，结果说明复合涂膜的滑子菇酚类物质积累程度较低，有利于延缓菇体褐变带来的颜色加深等不良品质。对于接病原菌处理的 B、D 组，结果类似，D 组滑子菇总酚含量增幅小，在整个贮藏期间均显著低于 B 组，说明复合涂膜后，即使受到了病害菌侵袭，滑子菇的总酚积累也更少，褐变程度更低。

2.3.2 复合涂膜处理对滑子菇类黄酮含量的影响

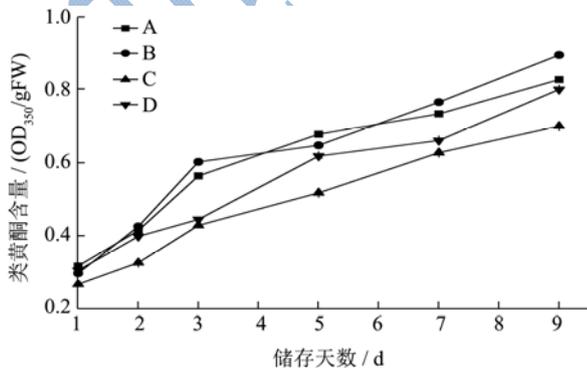


图 6 滑子菇贮藏过程中类黄酮含量的变化

Fig.6 The changes of the flavonoids content of *pholiota nameko* during refrigeration storage

注：A 表示涂无菌水处理；B 表示涂菌液处理；C 表示复合涂膜后涂无菌水处理；D 表示复合涂膜后涂菌液处理。

类黄酮化合物是高等植物从初生代谢作用中生成的重要的酚类次生代谢物，与植物花色合成密切相关[34,35]，是一类植物色素的总称，一般呈浅黄色或黄色。由图 6 可知，滑子菇类黄酮含量呈上升趋势，T Jiang 等[34]实验表明壳聚糖复合涂膜的香菇在贮存后期类黄酮含量也呈现上升趋势，酚类物质的代谢导致类黄酮的积累。未复合涂膜的 A、B 两组类黄酮含量均显著高于复合涂膜处理组，其中，C 组类黄酮含量均低于同期其他组，上升幅度最小。C 组滑子菇类黄酮含量显著低于 A 组，说明植物色素积累程度更低，有利于色泽的保持，延缓色泽加深；D 组滑子菇类黄酮含量明显低于 B 组，说明复合涂膜后，即使受到了病害菌侵袭，滑子菇的类黄酮积累也更少。

2.4 滑子菇菌落总数的测定

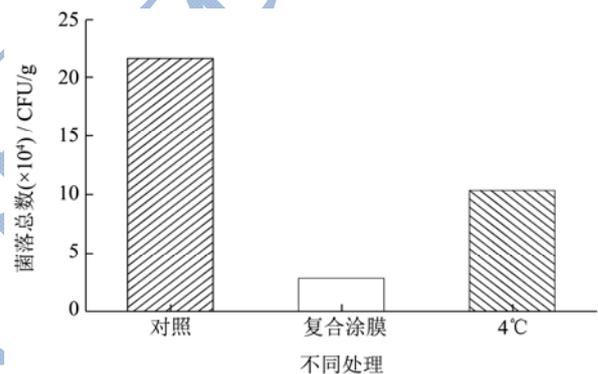


图 7 菌落总数测定

Fig.7 Determination of colony count



图 8 复合涂膜贮藏开始和结束时的状态

Fig.8 The state of *Pholiota nameko* at the first and the last day after treatment with composite coating

滑子菇的微生物感染也是造成子实体的衰老、品质下降等现象的原因。食用菌常常因为微生物感染导致软化腐烂，有毒物质，病害等，即使低温干燥的环境下也难以减少微生物侵害，食用菌微生物侵染致病问题不容忽视[6,8]。

滑子菇菌落总数测定情况如图 7 所示，图 8 反应

了复合涂膜的滑子菇在贮藏开始和结束时的状态。由图7和图8可知,贮藏结束时,对照组滑子菇的菌落总数高达 22.80×10^4 CFU/g,复合涂膜处理后的滑子菇菌落总数为 2.82×10^4 CFU/g,也低于4℃处理的滑子菇菌落总数;说明复合涂膜处理可以显著抑制滑子菇微生物数量的增长,抑制效果显著,比低温贮藏具有更好的抑菌效果,可有效防止因感染病害导致的褐变、软化、腐烂等品质下降,保持食用价值和经济价值。

本实验的复合涂膜具有良好的抗菌性能,主要和其成分中的百里香精油、nisin有关。百里香精油作为一种高效的植物源抑菌药物,已被证明具有广谱的抑菌性能^[12,13],邓雯瑾等^[12]通过荧光假单胞菌的回接实验,研究发现百里香复合薄膜对鲜切生菜的优势腐败菌具有很好的抑制效果。张乐等^[35]等发现,通过添加食品级乳链菌肽开发出的乳链菌肽-明胶-酪蛋白钙复合膜,不仅具有良好的力学和光学特性,而且能够有效地抑制食品腐败的革兰氏阳性菌的生长,从而增强对食物的保鲜效果。本实验结果表明 nisin 与海藻酸钠、L-半胱氨酸等制成的可食性复合涂膜对滑子菇病害菌侵染方面具有一定的应用价值,并为新型包装材料的研究和减轻环境压力,提供了理论基础。

3 结论

以海藻酸钠、L-半胱氨酸、百里香精油和 nisin 等可食性原料复配的天然保鲜剂浸泡食用菌,风干后形成薄膜。SOD、POD、PPO 和 PAL 为植物主要的抗氧化酶类,与植物体内活性氧代谢和抗病性密切相关,其活性的高低可以作为判断果实耐贮性指标和衰老的标志^[34,35]。结果发现,经复合涂膜处理的滑子菇,菇体 POD 酶活力峰值推迟 2 d 出现,且峰值高于未涂膜的滑子菇;PAL 活力下降缓慢且在贮藏期间显著高于未涂膜的滑子菇。说明涂膜后滑子菇的抗逆境能力更强,可更好地抵抗外伤胁迫和阻止病原菌的侵入,延缓子实体衰老;可溶性蛋白质含量流失较少且在贮藏期间均高于未涂膜的滑子菇,说明菇体保留了更多营养价值,衰老程度更低;MDA 含量增幅最小且在整个贮藏期间均显著低于对照,说明复合涂膜处理可有效减缓细胞的脂膜过氧化程度;滑子菇类黄酮含量显著低于对照,说明植物色素积累程度更低,有利于色泽的保持,延缓色泽加深;总酚含量在整个贮藏期间均显著低于对照,说明酚类物质积累程度低,有利于色泽的保持。在实验期间,复合涂膜处理的滑子菇具有更好的品质,涂膜后的滑子菇在遭到病菌侵袭后,菇体品质比未涂膜处理的滑子菇好。贮藏结束时,复合涂膜滑子菇的菌落总数显著低于对照组,也低于4℃冷

藏的滑子菇,菇体腐烂率更低,食用品质保持更好,说明复合涂膜可以有效防止病原菌的侵害和病害的发生,这主要与复合涂膜原料中百里香精油和 nisin 等抗菌剂的抑菌作用有关。

参考文献

- [1] Chang S T. Cultivation of the Straw Mushroom in Southeast China [J]. World Crops, 1965, 17: 47-49
- [2] Jouquet P, Bottinelli N, Lata J, et al. Role of the Fungus-growing termite *Pseudacanthotermes piniger* (Isoptera, Macrotermitinae) in the dynamic of clay and soil organic matter content. an experimental analysis [J]. Geoderma, 2007, 139(1-2): 127-133
- [3] 田平平,王杰,秦晓艺,等.采后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):941-951
TIAN Ping-ping, WANG Jie, QIN Xiao-yi, et al. Effect of postharvest treatment on the storage quality and antioxidant enzyme system of *Pleurotus eryngii* [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 941-951
- [4] 向莹,陈健.滑子菇营养成分分析与评价[J].食品科学,2013, 34(6):238-242
XIANG Ying, CHEN Jian. Analysis and evaluation of nutritional components in fruit body of *Pholiota nameko* [J]. Food Science, 2013, 34(6): 238-242
- [5] 胡开辉,陈体强,黄志龙.食用菌细菌性病害[J].福建农业科技,2000,3:15-18
HU Kai-hui, CHEN Ti-qiang, HUANG Zhi-long. Bacterial diseases of edible fungus [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2000, 3: 15-18
- [6] 食用菌侵染性病害的发生与综合防治[J].吉林蔬菜,2017, 7:35
The appearance and comprehensive prevention of bacterial disease on edible fungi [J]. Vegetables of Jilin, 2017, 7: 35
- [7] 张蓓,段小明,冯叙桥,等.果蔬复合涂膜保鲜的研究现状与发展趋势分析[J].食品与发酵工业,2014,40(4):125-132
ZHANG Bei, DUAN Xiao-ming, FENG Xu-qiao, et al. The analysis of composite film research status and development trend on fresh fruit and vegetable [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(4): 125-132
- [8] 陈思.大球盖菇的涂膜保鲜工艺及软罐头微波处理技术探讨[D].福州:福建农林大学,2013
CHEN Si. Preservation technology of *Stropharia* by Thin film and the Technology of Microwave processing about Soft canned of *Stropharia* [J]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2013

- [9] Mayachiew P. Comparative evaluation of physical properties of edible chitosan films prepared by different drying methods [J]. *Drying Technology*, 2008, 26: 176-185
- [10] 赵梅,李文香. 纳米壳聚糖对平菇保鲜效果的影响[J]. *食品工业*, 2017, 38(6): 96-98
ZHAO Mei, LI Wen-xiang. Effect of Chitosan nanoparticles on preservation of *Pleurotus ostreatus* [J]. *The Food Industry*, 2017, 38(6): 96-98
- [11] 张沙沙,邓雅元,刘绍雄,等. 复合涂膜保鲜剂对双孢蘑菇保鲜的影响[J]. *食品科技*, 2016, 41(12): 20-24
ZHANG Sha-sha, DENG Ya-yuan, LIU Shao-xiong, et al. Effect of composite coating treatment on postharvest preservation of *Agaricus bisporus* [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(12): 20-24
- [12] 邓雯瑾,蒋汶龙,陈安均,等. 百里香精油抗菌涂层包装对鲜切生菜货架期内理化品质及微生物的影响[J]. *贮运与保鲜*, 2016, 42(7): 247-253
DENG Wen-jin, JIANG Wen-long, CHEN An-jun, et al. Effects of thyme essential oil antimicrobial coating on fresh cut during lettuce shelf period [J]. *Storage and Preservation*, 2016, 42(7): 247-253
- [13] Sienkiewicz M, Lysakowska M, Kowalczyk E, et al. The ability of selected plant essential oils to enhance the action of recommended antibiotics against pathogenic wound bacteria [J]. *Burns Journal of the International Society for Burn Injuries*, 2017, 43(2): 310-317
- [14] 李伟丽,赵超,车建途,等. 腐败醋中微生物的分离鉴定及乳酸链球菌素对其抑制作用[J]. *食品科学*, 2015, 36(1): 174-178
LI Wei-li, ZHAO Chao, CHE Jian-tu, et al. Inhibitory effect of nisin on microorganisms isolated from spoiled vinegar [J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 174-178
- [15] Thierry R, Sandra C, Kimberly P, et al. Application regime for disease control using thyme oil [C]// *Proceedings of 18th congress of the international society for mushroom science*. Beijing: Institute of Agricultural Resources and Regional Planning of AAS, 2012: 338-342
- [16] 崔世瑞,冯志勇,陈明杰,等. 食用菌体内抗氧化酶活性影响因素的研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2015, 35(4): 87-92
CUI Shi-rui, FENG Zhi-yong, CHEN Ming-jie, et al. Advance in effective factories antioxidant enzyme activity in edible fungi [J]. *Journal of Microbiology*, 2015, 35(4): 87-92
- [17] 何成武,郝利平. 金针菇多酚氧化酶动力学特性的研究[J]. *食用菌*, 2012, 4: 6-7
HE Cheng-wu, HAO Li-ping. Study on dynamic properties of polyphenol oxidase in *Flammulina velutipes* [J]. *Edible Fungi*, 2012, 4: 6-7
- [18] 周巧丽,陈丹妮,叶笑,等. 海藻酸钠/纳米 TiO₂ 复合涂膜对香菇采后品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 1: 198-203
ZHOU Qiao-li, CHEN Dan-ni, YE Xiao, et al. Effect of sodium alginate/nano tio₂ composite coating on *Postharvest mushroom* quality [J]. *Journal of China Institute of Food Science and Technology*, 2014, 1: 198-203
- [19] 刘吟,李成华,吴关威,等. 双孢蘑菇子实体采后褐变及相关生化变化研究[J]. *中国食用菌*, 2010, 29(3): 48-51
LIU Yin, LI Cheng-hua, WU Guan-wei, et al. Study on browning and related biochemical change of postharvest *Agaricus Bisporus* [J]. *Edible Fungi of China*, 2010, 29(3): 48-51
- [20] GB 4789.2-2010, 食品卫生微生物学检验: 菌落总数测定[S]
GB 4789.2-2010, Food microbiological Examination: Aerobic Plate Count [S]
- [21] Remon S, Ferrer A, Marquina P, et al. Use of modified atmosphere to prolong the postharvest life of Burlatcheries at different degrees of ripeness [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(10): 1545-1552
- [22] 边晓琳. 不同气体成分和包装材料对金针菇采后品质和活性氧代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010
BIAN Xiao-lin. Effects of different gas composition and packaging material on active oxygen metabolism and quality of *Flammulina velutipes* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010
- [23] GAO Meng-sha, FENG Li-fang, JIANG Tian-jia. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment [J]. *Food Chemistry*, 2014, 149: 107-113
- [24] 张荣飞. 纳米复合膜的制备及其对双孢蘑菇保鲜效果的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015
ZHANG Rong-fei. Preparation of nanocomposite film as preservative of *Agaricus bisporus* [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015
- [25] Brown G E. Changes in phenylalanine ammonia-lyase, soluble phenolics and lignin in injured orange exocarp [J]. *Proceedings of the Annual Meeting of the Florida State Horticulture Society*, 1991, 103: 234-237
- [26] 徐晓梅. 苯丙氨酸解氨酶研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(31): 15115-15119, 15122
XU Xiao-mei. Advance in the studies of phenylalanine ammonia lyase [J]. *Journal of Anhui Agricultural science*, 2009, 37(31): 15115-15119, 15122
- [27] 王士奎. 平菇贮藏工艺优化及延缓其衰老机制的研究[D].

- 青岛:青岛农业大学,2013
- WANG Shi-kui. Study on optimization of storage technology and delaying senescence mechanism of *Pleurotus ostreatus* [D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2013
- [28] 张强,王松华,祝嫦娥,等.两种复配保鲜剂对双孢菇保鲜作用的研究[J].现代食品科技,2013,29(10):2431-2435,2558
- ZHANG Qiang, WANG Song-hua, ZHU Chang-wei, et al. Effects of two compound preservatives on *Agaricus bisporus* [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(10): 2431-2435, 2558
- [29] 巩晋龙.杏鲍菇(*pleurotuseryngii*)冷藏保鲜技术及自溶机理研究[D].福州:福建农林大学,2013
- GONG Jin-long. Study on freshness preservation technology and autolysis mechanism of *Pleurotus eryngii* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013
- [30] 陈斯凯.低温抑制猴头菇褐变机制研究[D].福州:福建农林大学,2015
- CHEN Kai-si. The mechanism for browning inhibition of *Hericium* under low temperature [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015
- [31] Aquino-Bolan E N, Mercado-Silva E. Effect of polyphenol oxidase and peroxidase activity, phenolics and lignin content on the browning of cut jicama [J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 33(3): 275-283
- [32] YE Jing-jun, LI Jian-rong, HAN Xiao-xiang, et al. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(3): 474-482
- [33] 范凯,胡双,范冬梅,等.植物类黄酮物质合成中的氮素调控[J].植物生理学报,2016,6:843-850
- FAN Kai, HU Shuang, FAN Dong-mei, et al. Regulation of nitrogen in the synthesis of plant flavonoids [J]. Plant Physiology Journal, 2016, 6: 843-850
- [34] JIANG Tian-jia, FENG Li-fang, ZHENG Xiao-lin, et al. Effect of chitosan coating enriched with thyme oil on postharvest quality and shelf life of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2012, 60: 188-196
- [35] 张乐,刘安军,韩悦,等.乳链菌肽对明胶-酪蛋白钙复合膜理化及抑菌特性的影响研究[J].现代食品科技,2016, 32(4): 52-58
- ZHANG Le, LIU An-jun, HAN Yue, et al. Effect of nisin on the physicochemical and anti-microbial properties of gelatin-calcium caseinate composite films [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4): 52-58