



食品科学

Food Science

ISSN 1002-6630, CN 11-2206/TS

《食品科学》网络首发论文

题目: 聚乙烯醇基SiO₂/TiO₂纳米包装膜及对双孢菇保鲜效果
作者: 马清华, 蔡铭, 谢春芳, 杨开, 孙培龙
网络首发日期: 2019-12-19
引用格式: 马清华, 蔡铭, 谢春芳, 杨开, 孙培龙. 聚乙烯醇基SiO₂/TiO₂纳米包装膜及对双孢菇保鲜效果. 食品科学.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191219.1554.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

聚乙烯醇基 SiO₂/TiO₂ 纳米包装膜及对双孢菇保鲜效果

马清华, 蔡 铭*, 谢春芳, 杨 开, 孙培龙

(浙江工业大学海洋学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:本研究制备了添加 SiO₂/TiO₂ 纳米粒子的聚乙烯醇 (PVA) 基纳米复合膜, 以市售 PE 膜为对照考察其主要性能的变化。以失重率、硬度、白度和感官评价等为指标, 探讨 6 种纳米复合膜对双孢菇的保鲜效果。研究表明, SiO₂ 和 TiO₂ 纳米粒子添加量为 1% 时, 其 CO₂ 透过率分别降低 12.58% 和 35.66%, H₂O 透过量分别降低 5.94% 和 8.92%; 抗拉强度、断裂伸长率和杨氏模量分别增加 23.86%、1.59% 和 96.24%, 机械性能增强。贮藏 5 天后, 由 1% SiO₂ 和 1% TiO₂ 纳米复合膜较纯 PVA 包装贮藏的双孢菇的失重率分别减少了 31.06% 和 32.87%; 由 1% SiO₂、2% SiO₂ 和 1% TiO₂ 纳米复合膜处理的双孢菇较纯 PVA 包装硬度值变化小, 分别达到 228.04 g、232.19 g 和 227.81 g; 此外, 经 1% TiO₂ 纳米复合膜处理的双孢菇具有更高的白度, 达 86.18。通过开伞程度、颜色、硬度和气味等感官指标评定, 1% TiO₂ 纳米复合膜具有更好的保鲜效果。

关键词: 双孢菇; 聚乙烯醇; 纳米包装膜; 贮藏效果

Evaluation of PVA-based SiO₂/TiO₂ Nanocomposite Films and Their Preservation Effect on *Agaricus bisporus*

MA Qinghua, CAI Ming*, XIE Chunfang, YANG Kai, SUN Peilong

(Ocean College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In this study, modified polyvinyl alcohol (PVA) films added of nano SiO₂/TiO₂ at different concentrations were prepared, evaluated and compared with polyethylene (PE) film. Storage effects of these nano films on *Agaricus bisporus* were demonstrated as well. Results showed when nano SiO₂/TiO₂ were added at 1%, the transmittance of CO₂ decreased by 12.58% and 35.66%, respectively, while permeation of H₂O decreased by 5.94% and 8.92%, respectively. The tensile strength, elongation at break and Young's modulus increased by 23.86%, 1.59% and 96.24%, respectively. After 5 days of storage, weight loss of *Agaricus bisporus* packed with 1% SiO₂ and 1% TiO₂ films decrease 31.06% and 32.87%, respectively, compared to those packed with PVA films. Hardness of *Agaricus bisporus* packed with 1% SiO₂, 2% SiO₂ and 1% TiO₂ films reduced to 228.04 g, 232.19 g and 227.81 g, respectively. In addition, whiteness treated with 1% TiO₂ film was the highest. According to the sensory indicators, 1% TiO₂ film showed better preservation effects on *Agaricus bisporus*.

Keywords: *Agaricus bisporus*; polyvinyl alcohol; nanocomposite films; storage effect

中图分类号: TS255.3, 文献标志码: A

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190515-153

双孢菇 (*Agaricus bisporus*) 又名白蘑菇、洋蘑菇, 分布于欧洲、亚洲的温带地区^[1]。双孢菇是目前世界上消费量最大的食用菌之一, 也是国内培养最广、产量最大的食用菌, 是我国出口创汇的主要食用菌^[2]。但是, 与市场上其它新鲜蔬菜相比, 双孢菇采后货架期极短, 一般只能维持 3~4 天^[3]。其原因是双孢菇水分含量非常高, 采后呼吸作用旺盛, 导致极易失水萎蔫, 同时, 菌盖无明显的保护结构, 易受到机械伤害和微生物污染, 导致子实体褐变乃至腐烂, 最终降低双孢菇的食品品质^[4]。目前, 双孢菇的采后保鲜技术主要集中在气调保鲜、涂膜保鲜、辐照处理和臭氧保鲜等^[5-8]。然而, 随着栽

基金项目: 浙江省重点研发项目 (2019C02100); 国家自然科学基金青年基金项目 (31401506)

第一作者简介: 马清华 (1993—) (ORCID: 0000-0002-7301-8258), 女, 硕士, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: 191901612@qq.com

*通信作者简介: 蔡铭 (1979—) (ORCID: 0000-0003-0782-9877), 男, 副教授, 博士, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: caiming@zjut.edu.cn

培方式的改进以及物流水平的提高,贮藏的要求已经从静态保鲜转向流通运输环节中的动态保鲜,传统的保鲜技术很难满足双孢菇等鲜活农产品的市场需求^[9]。因此,寻求新型包装技术迫在眉睫。

纳米保鲜技术是一种绿色、高效、节能的新型保鲜技术,在果蔬保鲜领域的应用已逐渐成为研究热点。与传统包装材料相比,纳米食品包装材料在抑菌、抑制乙烯产生、气体选择透过性等方面具有明显优势,尤其适合鲜活农产品的保鲜贮藏^[10]。据报道,采用纳米包装材料可以有效减缓金针菇的品质劣变、延长货架期^[11]。曾丽萍等^[12]研制的纳米 TiO_2 聚乳酸包装膜能更好地抑制香菇呼吸强度,减缓水分流失和维持较高 VC、还原糖含量,并且维持香菇的感官品质。Li 等^[13]制备的 TiO_2 聚乳酸包装膜与 LDPE 和纯聚乳酸包装膜相比能更好地维持奶酪的质量、pH 值等且具有更好的抗菌效果。Zhang 等^[14]研制的魔芋葡甘聚糖/角叉菜胶/纳米 SiO_2 包装膜有效降低了双孢菇的呼吸速率,延长了双孢菇的货架期。

本文研制了不同浓度的聚乙烯醇(PVA)基 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 纳米包装膜,并分析其结构特性及其对双孢菇贮藏品质的影响。从而探明纳米包装材料在双孢菇保鲜中的应用优势,为食用菌的保鲜技术提供潜在参考价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

双孢菇(均为当天采摘)购于当地农贸市场,运送至实验室后立即放入 4°C 冰箱内预冷 24 h。削去菇柄下端带泥部分,选择形状大小均匀(伞盖直径为 $45\text{ mm}\pm 5\text{ mm}$)、颜色洁白、无开伞、无机械损伤的双孢菇试验。

PE 膜购于广东省佛山市双富包装有限公司,规格厚度为 $50\mu\text{m}$ 。

聚乙烯醇 1799 (PVA), 纳米 SiO_2 , 纳米 TiO_2 购于麦克林公司,其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器 上海央申科技仪器有限公司;超声波分散仪 杭州宝珀超声波科技有限公司;SX-5000AX 型实验室涂布机 杭州大卫科教仪器有限公司;300 型塑料薄膜封口机 浙江临安斯普利电子有限公司;Vega 3 SBH 型扫描电子显微镜 捷克 Tescan 公司;WVTR-2505 型水蒸气透过率测试仪 济南思克测试技术有限公司;GTR-7001 型气体透过率测试仪 济南思克测试技术有限公司;微机控制电子万能材料试验机 上海协强仪器制造有限公司;TA.XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;ColorQuest XE 型色差仪 美国 HunterLab 公司。

1.3 方法

1.3.1 涂膜液的制备

准确称量 15 g PVA 树脂溶于 150 mL 蒸馏水中,加入 1.5 g 甘油作为增塑剂, 95°C 恒温搅拌 3 h,冷却得到 PVA 母液作为空白对照组,分别将相当于 PVA 质量的 1% 纳米 SiO_2 、2% 纳米 SiO_2 、1% 纳米 TiO_2 、2% 纳米 TiO_2 分散于 PVA 母液中,超声处理 (360W) 45 min,得到 4 种 PVA 纳米复合溶液。

1.3.2 包装膜的制备

将上述制得的涂膜液倾倒在实验室涂布机上,涂成均匀的涂层, 55°C 加热干燥 1 h 后揭膜,制得 5 种 PVA 纳米包装膜,厚度为 $50\mu\text{m}$,分别标记为 P0 (空白对照)、S1 (1% 纳米 SiO_2 添加量)、S2 (2% 纳米 SiO_2 添加量)、T1 (1% 纳米 TiO_2 添加量)、T2 (2% 纳米 TiO_2 添加量),放入 25°C , RH 53% 恒温恒湿培养箱内,平衡 48 h 后进行性能测试。

1.3.3 纳米包装膜结构表征

采用扫描电子显微镜观察包装膜表面及横截面的微观结构以及纳米 SiO_2 和 TiO_2 的分散情况。取平整的样品薄膜,将其裁切为合适大小后粘贴在载物台上,喷金后用扫描电子显微镜观察并拍摄薄膜横截面,加速电压为 15 kV,放大倍数为 3000 倍。

1.3.4 透气性测定

(1) 将包装膜裁剪成直径为 76 mm 的圆形样品,用水蒸气透过率测试仪测定水蒸气透过量,温度 38℃,相对湿度 90%,每个试样测 6 次,取平均值。

(2) 将包装膜裁剪成 150 mm × 94 mm 的条状,用气体透过率测试仪测定二氧化碳透过率,测试温度为 23℃,相对湿度为 50%,每个试样测 6 次,取平均值。

1.3.5 薄膜力学性能测定

采用万能材料试验机测量薄膜的抗拉强度和断裂伸长率,分别沿样品的长度和宽度方向裁取宽度为 20 mm 的薄膜样品,夹距设为 50 mm,拉伸速度设为 200 mm/min,环境温度为 20℃,相对湿度 50%,每个样品测 10 次,取平均值。

1.3.6 纳米包装膜对双孢菇的贮藏效果

使用封口机将市售 PE 膜和自制的 5 种纳米包装膜分别制成规格为 140 mm × 185 mm 的包装袋。每袋装取双孢菇 120 g ± 5 g,记为阳性对照组 (PE) (阳性对照组),阴性对照组 (P0) 和处理组 (S1、S2、T1、T2),用封口机密封保存,温度 10 ± 1℃,相对湿度 90% ± 2%,贮藏 5 天,每天进行各项指标测定,每组试验重复 3 次。测定指标包括硬度、白度、失重率、感官评价。

1.3.6.1 硬度和白度测定

双孢菇硬度使用质构仪测定,选择 P/2 型探头,以 1 mm/s 测试速度穿刺蘑菇,得到硬度值。颜色采用 ColorQuest XE 型色差仪进行测定。每个处理取 3 个蘑菇,每个蘑菇测 10 次,取其平均值。

1.3.6.2 失重率测定

失重率采用差量法^[15],将刚包装的双孢菇称重并记录初始质量,之后每隔 24 h 称重一次,按公式 (1) 计算,每组重复 3 次,取平均值。

$$\text{失重率}/\% = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\%$$

(1)

式中: m_0 表示双孢菇初始质量/g; m 表示双孢菇取样时质量/g

1.3.6.3 感官评价

参照王萍和潘艳娟等^[16, 17]的方法并稍加改动,双孢菇感官评价标准见表 1。招募 10 名志愿者 (男女各 5 名) 组成评价小组对双孢菇的形状、颜色、气味、质地进行综合评价。通过加权平均原则计算样品分值,形状加权系数为 0.2,颜色为 0.2,气味为 0.3,质地为 0.3,设最低分为 7.5 分,低于 7.5 分则失去商品流通价值。

表 1 双孢菇感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of *Agaricus bisporus*

等级	分值	开伞程度	颜色	质地	气味
1	9	均未开伞	洁白	菇体丰满有弹性	无异味
2	8	出现开伞前兆	较白,出现轻微变化	稍萎蔫	轻微异味
3	7	轻微开伞	轻微褐变	轻微萎蔫	明显异味
4	6	开伞严重	严重褐变	严重萎蔫	臭味

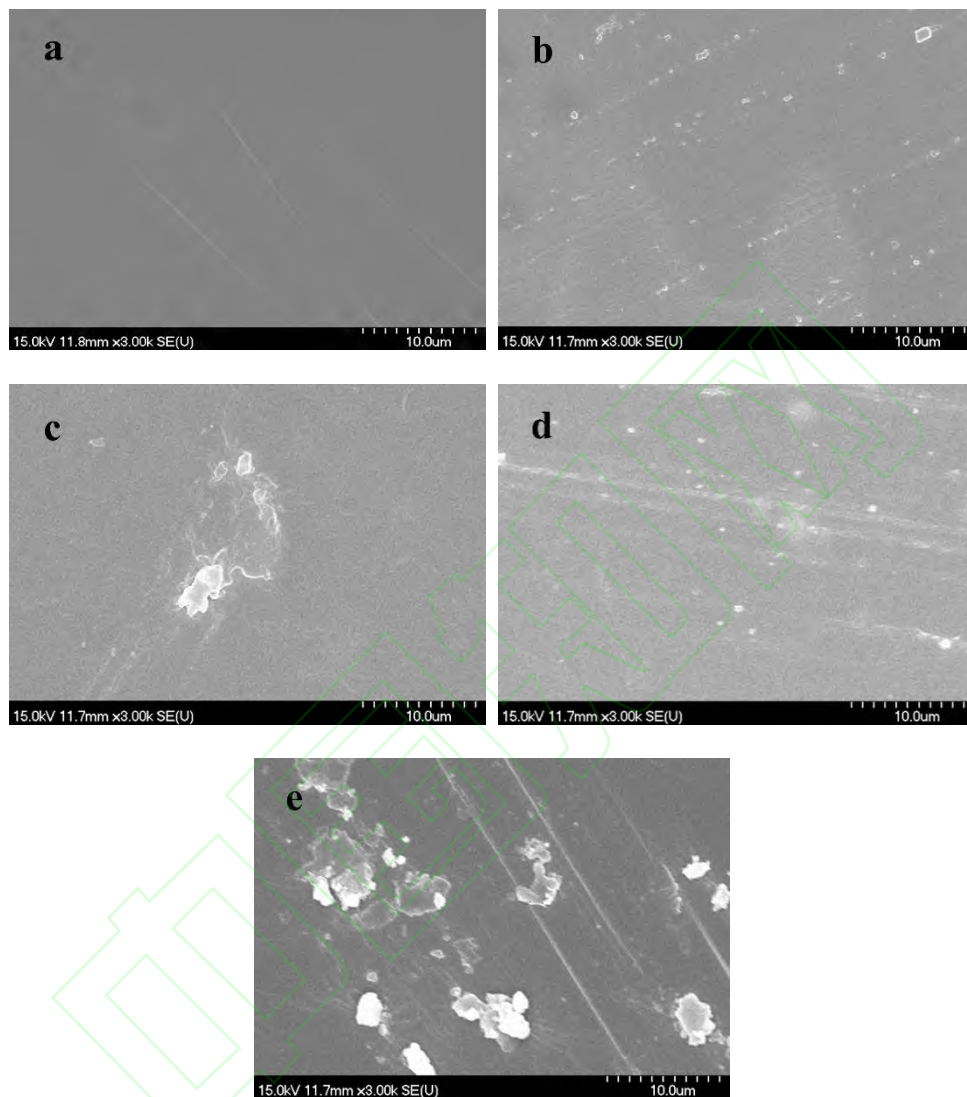
1.4 数据统计处理

采用 Excel 2016 对数据进行基础处理,用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析,使用邓肯氏 (Duncan's) 进行多重比较,若 $P < 0.05$ 则表示差异性显著,用 Origin 9.0 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 纳米包装膜的微结构特征

由图1(a)可见,未添加纳米粒子的膜表面平滑无裂痕。纳米粒子添加量为1%时,纳米SiO₂和纳米TiO₂粒子均匀分散在PVA中,如图1(b)和(d)所示。而当纳米粒子添加量为2%时,两种纳米粒子均出现严重的团聚现象,如图1(c)和(e)所示。纳米粒子的团聚可能会影响薄膜的致密性。这表明无论是SiO₂还是TiO₂纳米粒子,在添加量为1%时相容性较好。



a~e 分别为 P0 膜、S1 膜、S2 膜、T1 膜、T2 膜

图 1 各种膜的扫描电镜图

Fig.1 SEM images of different films

2.2 纳米包装膜的阻隔性

图2为处理组纳米包装膜与未添加纳米粒子的PVA膜(空白对照)、市售PE膜(阳性对照)的比较。就CO₂透过率而言,PVA膜比PE膜低约1000倍,而对于H₂O透过量,PVA膜比PE膜高约100倍。PVA分子链上存在大量的羟基,属于极性聚合物,因此对非极性的CO₂有较强的阻隔性,而对弱极性的水的阻隔性较差^[18]。纳米粒子的加入显著($p<0.05$)降低了包装膜的透水性。这是由于纳米SiO₂、TiO₂粒径小,易分布到高分子链的空隙中,与PVA大分子互相结合成致密的立体网状结构,同时SiO₂、TiO₂纳米粒子具有巨大的比表面积和很高的表面能,有很大的活性,可以很好地与PVA表面发生吸附作用^[19],从而增强膜的致密性,提高阻隔性。但是,纳米粒子添加量为2%的纳米包装膜CO₂透气性却高于

纳米粒子添加量为1%的纳米包装膜。原因可能是在较低浓度下，纳米颗粒可以更均匀地嵌入PVA大分子网状结构中；而高浓度的纳米颗粒干扰了PVA链的排列方式，使之趋于无序，降低了膜的结晶度，增加了无定型区，因此增加了气体通量^[20]。

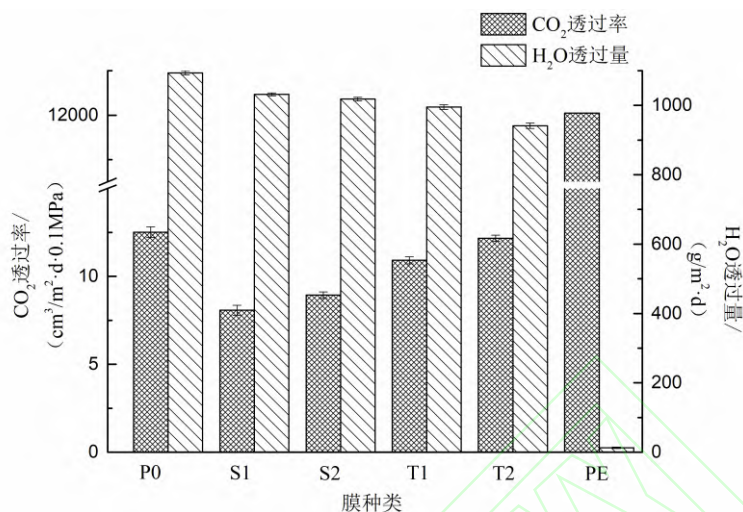
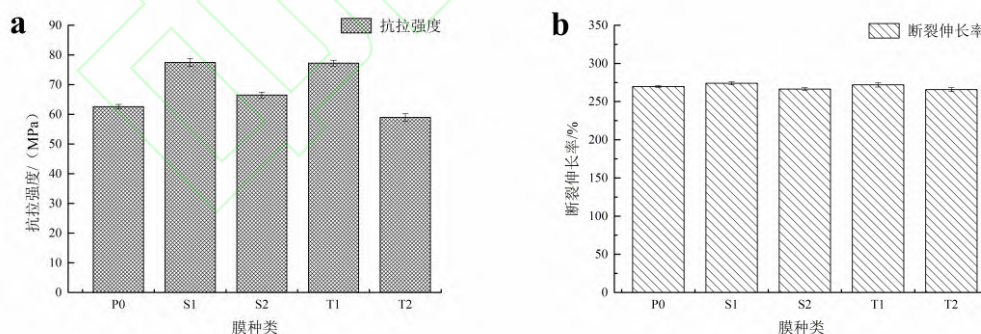


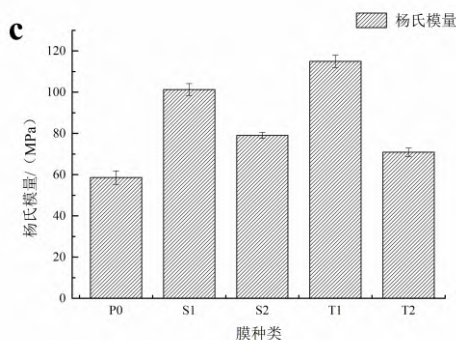
图2 各种膜的阻隔性能比较

Fig.2 Comparison of gas barrier properties of various films

2.3 纳米包装膜的机械性能

图3为不同纳米复合膜机械性能。添加量为1%的纳米SiO₂和纳米TiO₂复合膜机械性能最佳但差异不明显（ $p>0.05$ ），添加量为1%的纳米TiO₂包装膜杨氏模量最高，较纯PVA膜增加96.24%。加入1%纳米粒子纳米SiO₂使膜的抗拉强度增加了23.86%，断裂伸长率增加了1.59%，适量的纳米粒子和聚合物之间良好的相互作用力产生了有效的载荷传递，纳米粒子分担并传递了载荷，使得PVA机械性能得到提高^[21]，杨达等^[22]也得出类似结论。添加量为2%的纳米复合膜抗拉强度、断裂伸长率和杨氏模量都有所降低，原因是纳米粒子添加量高的纳米复合膜，粒子之间容易团聚，从而形成微米簇，不但起不到增强增韧的作用，反而使薄膜的机械性能降低^[23]，这与黄静等^[24]得到的结论相似。





a~c分别为纳米包装膜的抗拉强度、断裂伸长率、杨氏模量

图3 各种膜的机械性能比较

Fig.3 Comparison of mechanical properties of various films

2.4 纳米包装膜对双孢菇的贮藏效果

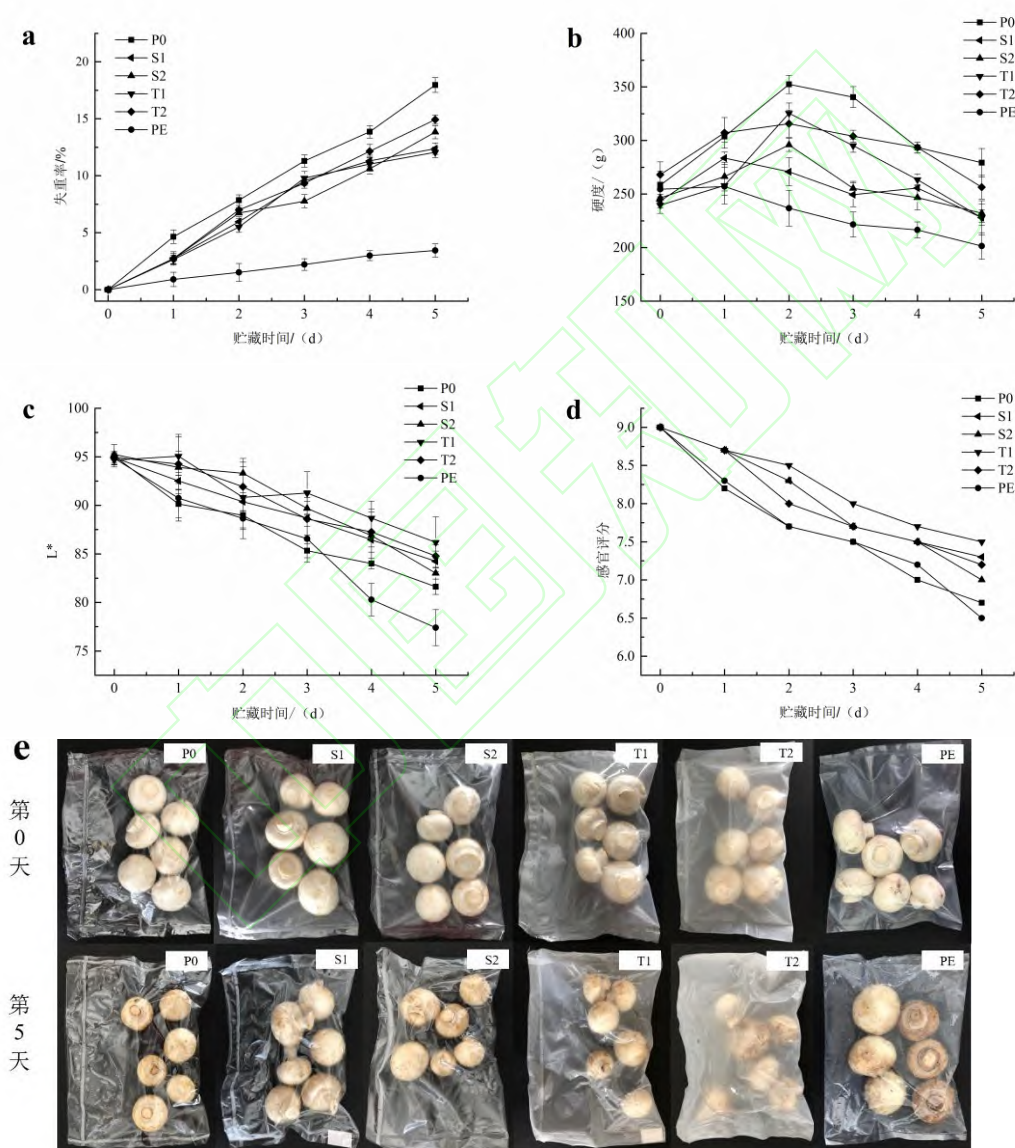
含水量是双孢菇新鲜度的重要指标之一。双孢菇在贮藏期间进行呼吸作用会分解有机物,并且蒸腾作用会造成水分流失,引发子实体萎蔫和腐烂^[25]。如图4(a)所示,随贮藏时间的增加,各种包装材料处理的双孢菇失重率均上升。其中,PE膜处理的双孢菇失重率始终处于较低水平,显著($p<0.05$)低于PVA包装膜处理组,第5天时仅为3.45%。P0膜空白组双孢菇失重率最高,第4天高达13.86%。处理组双孢菇失重率显著($p<0.05$)低于P0组。在贮藏第5天,S1组和T1组失重率分别为12.39%和12.06% ($p>0.05$),S2组和T2组达13.83%和14.93%。S1组和T1组较S2组和T2组在贮藏时间上延长1天。实验结果与膜阻隔性得出的结论一致。添加纳米粒子的PVA包装膜较未添加纳米粒子的PVA包装膜透水量低,CO₂透过率低,可以更好地抑制双孢菇贮藏期间水分的蒸发,降低呼吸作用,减少有机物的消耗。

硬度的变化是果蔬从成熟转向衰老的特征之一。果蔬的硬度主要取决于细胞壁的机械强度和细胞的膨压,而这两者与其体内大分子物质和水分含量密切相关^[26]。双孢菇在不同包装膜中的硬度变化如图4(b)所示。随贮藏时间的延长,PE组处理的双孢菇硬度呈逐渐下降趋势,第5天硬度达201.52 g,由于PE膜透水性差,蒸腾作用逸失的水分保留在包装袋中,这为腐败微生物提供了高湿的环境,且由于双孢菇开伞到一定程度木质化明显,进一步加速双孢菇变软^[27]。P0及4种纳米包装膜处理的双孢菇硬度变化趋势均呈先上升后下降,是因为PVA膜透水量较大导致双孢菇贮藏前期失水较多而变硬,贮藏后期变软是由于双孢菇子实体进入衰老期,营养物质和细胞壁逐渐降解,细胞膨压不断下降而导致^[28]。此外,也有研究指出高浓度CO₂有利于保持双孢菇的硬度^[29],因此纳米包装膜组硬度变化趋势较小。贮藏第5天,S1、S2、T1组双孢菇硬度值分别达228.04 g、232.19 g、227.81 g差异不显著($p>0.05$)。

双孢菇在贮藏过程中会发生酶促褐变,使色泽由白色转变为褐色或黑色,从而失去商业价值^[30]。通常用白度(L^*)表示双孢菇表面颜色的亮度, $L^*>86$ 为好品质, $80\leq L^*\leq 85$ 为可接受品质^[31]。由图4(c)可以看出,贮藏期间双孢菇的白度整体呈下降趋势。PE膜、P0膜包装的双孢菇白度下降迅速,在第5天白度分别降到 81.62 ± 0.79 , 77.41 ± 1.86 。而经纳米包装膜处理的蘑菇褐变程度显著($p<0.05$)低于对照组。包装后0-3天白度值均保持在87以上,说明双孢菇具有良好的色泽。第5天处理组白度在83-86之间,处于可接受范围。经T1膜包装的蘑菇白度(86.18 ± 2.63)略高于T2组(84.79 ± 1.16)、S1组(84.23 ± 1.06),差异不显著($p>0.05$);T1、T2组显著($p<0.05$)高于S2组(83.01 ± 1.53)。说明纳米包装膜可有效延缓双孢菇表面颜色变暗,抑制酚类化合物氧化引起的褐变,且纳米TiO₂包装膜较纳米SiO₂包装膜能更好保持双孢菇的色泽,是由于纳米TiO₂具有光催化抗菌性能^[32],抑制双孢菇表面微生物的生长从而维持其白度,这与邱松山等^[33]、解淑慧等^[34]研究结果相似,将纳米TiO₂用于荸荠、沙糖橘保鲜,有效延缓了褐变。

感官评价是对双孢菇商品价值最直观的反应。双孢菇采后易发生褐变,开伞,脱水萎蔫,并且容易受到微生物侵染导致腐败,通过感官评价可了解不同包装膜对双孢菇的实际保鲜效果。如图4(d)

所示,在贮藏期间,PE组、P0组与处理组对双孢菇的保鲜效果上表现出明显差异,在第2天,PE组膜内壁便出现细微水珠,并且蘑菇发生褐变,P0组和4种纳米膜包装的双孢菇子实体出现变硬的现象,这是由于膜具有一定的透水量造成的^[35]。至第4天,PE组双孢菇出现开伞现象,并产生异味;P0组轻微开伞,褐变加重;而4种纳米膜组均出现菌柄伸长,产生少量气生菌丝的现象,这与膜的CO₂透过率有关,4种纳米膜CO₂透过率最低,导致包装袋内的CO₂浓度相对较高,抑制双孢菇的开伞、褐变与腐败^[36]。至贮藏第5天,PE组双孢菇品质最差,从图4(e)可以看到,PE包装袋内壁布满水珠,是水蒸气透过率较低所致,双孢菇表面的水分为微生物提供了适宜生存的环境,致使褐变严重、产生腐臭气味,T1组双孢菇综合评分较高,整个贮藏期间未出现腐败现象,是由于纳米TiO₂具有抗菌作用。这与Li等^[13]研究相似,用添加纳米TiO₂的聚乳酸包装膜保藏奶酪,菌落总数显著低于不加纳米粒子的聚乳酸包装膜。Fang等^[11]也得出了相似的结论,经纳米包装处理的金针菇感官评价优于普通包装。



a~e分别为贮藏期间内双孢菇失重率、硬度、白度、感官评分趋势图、整体外观图

图4 不同种类膜处理对双孢菇的贮藏效果

Fig.4 Storage effect of different kinds of film treatment on *Agaricus bisporus*

3 结论

通过在PVA中添加不同浓度的SiO₂和TiO₂纳米粒子来赋予PVA膜一定的功能性,改善PVA膜的透

气性及机械性能。添加量为1%的SiO₂/TiO₂纳米粒子能够更均匀地分散在PVA膜中,降低CO₂及H₂O的透过量,增强膜的机械性能。添加量为2%的SiO₂/TiO₂纳米的PVA膜在扫描电镜中观察到团聚现象,CO₂透过量增加,抗拉强度、断裂伸长率和杨氏模量减弱,而H₂O透过量降低。

PVA基纳米包装膜对双孢菇具有较好的自发气调保鲜效果。与纯PVA相比,1% SiO₂/TiO₂纳米包装膜能明显降低双孢菇的失重率,贮藏第5天失重率分别为降低了31.06%和32.87%。由于纳米粒子的添加,改善了包装袋内气体成分,保持了双孢菇较高的硬度及白度。通过感官综合评价,1%的TiO₂纳米PVA包装膜对双孢菇的保鲜效果最好,贮藏结束得分为7.5分,而PE膜和纯PVA膜仅为6.5分和6.7分。

参考文献

- [1] 王娟,程萌,孔瑞琪,等. 植物精油海藻酸钠复合膜对双孢蘑菇的抑菌保鲜效果研究[J]. 农业工程学报, 2019,35(5):311-318.DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.05.038.
- [2] LIU J, LIU S, ZHANG X, et al. Effect of gallic acid grafted chitosan film packaging on the postharvest quality of white button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019,147:39-47.DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.09.004.
- [3] 周振, 赵立, 郭圣伦, 等. 双孢菇涂膜保鲜技术研究[J]. 中国果菜, 2018,38(11):1-5.DOI:10.19590/j.cnki.1008-1038.2018.11.001.
- [4] 胡焯, 胡秋辉, 郁志芳, 等. 复合护色剂预处理及不同冻融条件对冷冻双孢蘑菇品质的影响[J]. 食品科学, 2018,39(23):192-198.DOI:10.7506/spkx1002-6630-201823029.
- [5] 王相友, 张惠, 李玲, 等. 高氧气调后续效应对双孢蘑菇货架品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017,48(7):309-316.DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.039.
- [6] ZHANG R, WANG X, LI L, et al. Optimization of konjac glucomannan/carrageenan/nano-SiO₂ coatings for extending the shelf-life of *Agaricus bisporus*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019,122:857-865.DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.10.165.
- [7] CARDOSO R V C, FERNANDES Â, BARREIRA J C M, et al. Effectiveness of gamma and electron beam irradiation as preserving technologies of fresh *Agaricus bisporus* Portobello: A comparative study[J]. Food Chemistry, 2019,278:760-766.DOI:10.1016/j.foodchem.2018.11.116.
- [8] 陈存坤, 董成虎, 纪海鹏, 等. 臭氧处理对双孢菇采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2015,36(17):155-158.DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2015.17.039.
- [9] 李志啸, 杨文建, 方东路, 等. 纳米包装材料对双孢菇细胞壁代谢及品质的影响[J]. 食品科学, 2016,37(6):248-253.DOI:10.7506/spkx1002-6630-201606045.
- [10] 何潇, 高巧侠, 张正周. 纳米TiO₂在果蔬包装中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017,17(4):101-107.DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2017.04.019.
- [11] DONGLU F, WENJIAN Y, KIMATU B M, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on storage stability of mushrooms (*Flammulina velutipes*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016,33:489-497.DOI:10.1016/j.ifset.2015.11.016.
- [12] 曾丽萍, 樊爱萍, 杨桃花, 等. PLA/TiO₂纳米复合膜对香菇保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2017,38(16):225-228.DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.16.042.
- [13] LI W, LI L, ZHANG H, et al. Evaluation of PLA nanocomposite films on physicochemical and microbiological properties of refrigerated cottage cheese[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018,42(1):e13362.DOI:10.1111/jfpp.13362.
- [14] ZHANG R, WANG X, LI L, et al. Optimization of konjac glucomannan/carrageenan/nano-SiO₂ coatings for extending the shelf-life of *Agaricus bisporus*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019,122:857-865.DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.10.165.
- [15] 王利斌, 林晨, 罗海波, 等. 预冷时机对四季豆和豇豆品质和生理生化特性的影响[J]. 食品科学, 2018,39(9):232-238.DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809035.

- [16] 王萍. 易腐烂果蔬物流气调包装中若干关键技术的研究[D]. 江南大学, 2009.
- [17] 潘艳娟, 王建清, 王猛. 气调与精油等包装技术联合应用对双孢菇品质的影响[J]. 包装工程, 2015,36(9):33-37.DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2015.09.007.
- [18] 温珍才, 叶保平. 食品包装薄膜的透气性测试研究[J]. 包装工程, 1993,14(1):17-20.
- [19] 张立德. 纳米材料[M]. 北京: 化工工业出版社, 2000: 132.
- [20] 唐智鹏, 陈晨伟, 谢晶. 纳米二氧化钛对聚乙烯醇吸湿特性及抗菌性能的影响[J]. 食品与机械, 2018,34(7):106-110.DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2018.07.023.
- [21] SONG P, CAO Z, CAI Y, et al. Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties[J]. Polymer, 2011,52(18):4001-4010.DOI:10.1016/j.polymer.2011.06.045.
- [22] 杨达. 蛭石改性聚乙烯醇薄膜的制备及其性能研究[D]. 北京印刷学院, 2019.
- [23] 徐冬梅, 张可达, 樊智虹, 等. 纳米 SiO₂ 改性聚乙烯醇渗透汽化膜[J]. 化工科技, 2003,11(2):25-27.DOI:10.16664/j.cnki.issn1008-0511.2003.02.007.
- [24] 黄静, 赵琦, 卓坚锐, 等. 交联PVA/SiO₂复合膜的制备及性能[J]. 塑料, 2010,39(1):7-8.
- [25] 王相友, 闫聪聪, 刘战丽. 可食性涂膜对双孢蘑菇生理和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2012,43(1):141-145.DOI:1000-1298(2012) 01-0141-05.
- [26] 巩晋龙. 杏鲍菇 (*pleurotus eryngii*) 冷藏保鲜技术及自溶机理研究[D]. 福建农林大学, 2013.
- [27] 胡云峰, 魏增宇, 刘云云. 气体比例对小包装双孢菇品质的影响[J]. 包装工程, 2017,38(17):19-24.DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2017.17.005.
- [28] ANTMANN G, ARES G, LEMA P, et al. Influence of modified atmosphere packaging on sensory quality of shiitake mushrooms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008,49(1):164-170.DOI:10.1016/j.postharvbio.2008.01.020.
- [29] Sim n A, Gonz lez-Fandos E, Tobar V. The sensory and microbiological quality of fresh sliced mushroom (*Agaricus bisporus* L.) packaged in modified atmospheres[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2005,40(9):943-952.DOI:10.1111/j.1365-2621.2005.01028.x.
- [30] FERNANDES , ANTONIO A L, BARREIRA J C M, et al. Effects of gamma irradiation on physical parameters of *Lactarius deliciosus* wild edible mushrooms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012,74:79-84.DOI:10.1016/j.postharvbio.2012.06.019.
- [31] RIBEIRO C, VICENTE A A, TEIXEIRA J A, et al. Optimization of edible coating composition to retard strawberry fruit senescence[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007,44(1):63-70.DOI:10.1016/j.postharvbio.2006.11.015.
- [32] 尹忠琳, 陈桂芸, 曲亮璠, 等. 抗菌性无定型纳米二氧化钛/聚乳酸膜的制备及表征[J]. 食品科学, 2019,40(8):8-14.DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180208-112.
- [33] 邱松山, 李喜宏, 胡云峰, 等. 壳聚糖/纳米 TiO₂ 复合涂膜对鲜切荸荠保鲜作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2008(1):149-151.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2008.01.031.
- [34] 解淑慧, 王维琴, 叶卫东, 等. 纳米 TiO₂-壳聚糖复合涂膜对砂糖橘的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2012,38(4):219-223.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2012.04.020.
- [35] 付正义, 张一珠, 李伟, 等. 生物可降解聚乳酸薄膜对白玉菇保鲜效果研究[J]. 食品工业, 2016,09(37):136-140.
- [36] HAMMOND J B W, NICHOLS R. Changes in respiration and soluble carbohydrates during the post-harvest storage of mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1975,26(6):835-842.DOI:10.1002/jsfa.2740260615.