

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2026.0202

松针精油-茶氨酸涂膜结合自发气调与吸附剂对大球盖菇的保鲜效应

高帅平, 李顺峰, 王安建, 刘丽娜, 崔国梅, 田广瑞

(河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002)

摘要:为探索大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*)的高效保鲜技术,将 1.5%松针精油与 0.2%茶氨酸复配涂膜剂,结合双向拉伸聚丙烯(BOPP)袋自发气调包装与吸附剂进行复合保鲜处理,以未作任何处理的大球盖菇为对照,于 4 °C、RH 85%条件下贮藏 10 d,系统比较了感官品质、失重率、呼吸强度、硬度、褐变指数、营养指标及多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性等指标的变化。结果表明,与对照组相比,贮藏 10 d 时复合处理组(T3)显著抑制了呼吸强度,为 T1 组的 74.9%,降低了失重率(5.0%),维持了较高的感官评分(6.67 分,较 T1 组高 74.2%),并延缓了褐变指数上升;同时,T3 处理有效抑制了 PPO 和 POD 活性,使可溶性蛋白含量(w,后同)维持在 6.42 mg·g⁻¹(较 T1 组高 25.1%),贮藏 8 d 时抗坏血酸和总酚含量也显著高于对照组。综上,松针精油-茶氨酸涂膜结合吸附剂与 BOPP 自发气调包装的协同处理可通过主动抗氧化与被动气调的双重作用,有效延缓大球盖菇采后品质劣变,为其贮藏保鲜提供了理论依据。

关键词:大球盖菇;松针精油;茶氨酸;涂膜;自发气调;吸附剂

中图分类号:S646

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)09-074-08

Preservation effect of pine needle essential oil-theanine coating combined with modified atmosphere and adsorbent on *Stropharia rugosoannulata*

Gao Shuaiping, Li Shunfeng, Wang Anjian, Liu Lina, Cui Guomei, Tian Guangrui

(Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: To explore an efficient preservation technology for *Stropharia rugosoannulata*, this study applied a composite coating agent consisting of 1.5% pine needle essential oil and 0.2% theanine, combined with biaxially oriented polypropylene (BOPP) spontaneous modified atmosphere packaging and adsorbent for comprehensive preservation treatment. Untreated *S. rugosoannulata* was used as the control. All samples were stored at 4 °C and RH 85% for 10 days, and changes in sensory quality, mass loss rate, respiration rate, hardness, browning index, nutritional indices, as well as activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) were systematically evaluated. The results showed that compared with the control, the combined treatment (T3) significantly inhibited respiration rate (74.9% of T1 at day 10), reduced weight loss rate (5.0%), maintained a higher sensory score (6.67 points, 74.2% higher than that of T1), and delayed the increase in browning index. Meanwhile, T3 effectively suppressed PPO and POD activities, maintained soluble protein content at 6.42 mg·g⁻¹ (25.1% higher than that of T1), and kept significantly higher levels of ascorbic acid and total phenols than the control at storage 8 d. In conclusion, the synergistic treatment combining pine needle essential oil - theanine coating with adsorbent and BOPP spontaneous modified atmosphere packaging can effectively delay the postharvest quality deterioration of *S. rugosoannulata* through the dual actions of active antioxidation and passive modified atmosphere effects, providing a technical reference for its storage and preservation.

Key words: *Stropharia rugosoannulata*; Pine needle essential oil; Theanine; Coating; Spontaneous modified atmosphere; Adsorbent

收稿日期:2026-03-12;修回日期:2026-04-17

基金项目:河南省农业科学院自主创新项目(2026ZC97);河南省中央引导地方科技发展资金项目(2025ZYD03, Z20241471135);河南省科技攻关项目(262102110084);河南省重点研发专项资助项目(231111112500);河南省农业科学院科技创新团队专项(2024TD35)

作者简介:高帅平,女,助理研究员,主要从事农产品加工与贮藏研究。E-mail:gaoshuaiping@163.com

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*)又称皱环球盖菇、皱球盖菇、酒红大球盖菇、裴氏球盖菇或裴氏假黑伞^[1],其子实体色泽鲜艳、肉质厚实,在营养成分上与其他食用菌存在显著差异。大球盖菇除富含氨基酸、粗脂肪、蛋白质等基础营养成分外,还含有多糖、黄酮、酚类、甾醇及少量凝集素等功能性物质^[2]。Li等^[3]研究发现,大球盖菇中含有丰富的游离肽,其中半数以上具有咸味与鲜味,呈味特性优良。然而,大球盖菇出菇期高度集中,采后呼吸代谢旺盛,组织脆嫩、菌盖薄、菌柄软,极易因机械损伤诱发微生物侵染及生理劣变。加之新鲜子实体含水量高,若采后处理不及时或包装防护不当,常出现失水萎蔫、开伞、褐变、菌柄基部萌发白色气生菌丝及软腐等症状,严重制约其商品化流通^[4]。

目前,食用菌采后保鲜主要依赖于低温贮藏^[4]、自发气调包装^[5]及保鲜剂涂膜处理^[6]等技术。低温可有效抑制呼吸代谢与微生物活动,常与其他保鲜手段联合应用^[7]。自发气调包装虽能降低食用菌的呼吸速率,但对乙烯释放的抑制效果有限;结合保鲜剂处理后,乙烯生成显著受抑制^[8]。化学合成保鲜剂虽成本低廉,但长期使用存在残留超标风险,正逐渐被替代^[9]。植物精油因天然来源、环境友好及人体安全性,在果蔬保鲜领域受到广泛关注。其抗菌特性可有效维持采后果蔬的感官品质,延长货架期^[10]。其中,松针精油对多种病原菌表现出强抑菌活性与抗氧化能力,其复配保鲜剂可显著延长红毛丹货架期^[11],在面包制品中亦具有保鲜效果^[12]。茶氨酸同样来源于天然产物,兼具抗菌与抗氧化功能,目前已广泛应用于食品工业^[13-14]。此外,针对包装材料透气性不足的问题,在密闭容器内添加气体吸附剂可有效降低厌氧呼吸风险^[15],并能明显抑制食用菌褐变及感官品质劣变^[16]。

目前,将松针精油与茶氨酸复配作为涂膜保鲜剂应用于果蔬,尤其在大球盖菇保鲜方面的研究仍较为有限。因此,本研究采用BOPP保鲜袋自发气调包装,结合松针精油-茶氨酸涂膜与吸附剂,对大球盖菇进行复合保鲜处理,研究其在4℃贮藏条件下的品质变化,旨在为大球盖菇采后保鲜技术的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜大球盖菇于2024年3月11日采摘自河南百耕农业发展有限公司,七八成熟,菌盖直径为

4~5 cm、菌柄长4~6 cm,确保大球盖菇大小均一;双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜,购自珠海辉丰集团有限公司;松针精油,购自上海妆润生物科技有限公司;茶氨酸,购自广州新如荣生物科技有限公司;吸附剂为实验室自制,由硅胶、高锰酸钾、活性氧化铝、4A分子筛和13X分子筛按一定比例复配,该吸附剂中,硅胶和活性氧化铝可吸收包装内多余水分,高锰酸钾能吸附乙烯等挥发性代谢产物,4A与13X分子筛可选择性吸附二氧化碳、氨气等气体,各组分协同降低包装内不利于保鲜的气体浓度,维持适宜的气调微环境。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 前期预试验分别研究了不同体积分数松针精油(0.5%~2.0%)与不同质量分数茶氨酸(0.1%~0.5%)单独处理对大球盖菇表面状态及风味的影响,发现1.5%松针精油及0.2%茶氨酸处理的保鲜效果最佳,因此,选用1.5%松针精油+0.2%茶氨酸制作大球盖菇的涂膜剂。在预试验基础上,挑选菇形饱满、成熟度一致、无机械损伤的大球盖菇子实体,用毛刷轻柔刷去菇体表面泥土等杂质,将整理好的大球盖菇随机分为4组:以大球盖菇不做任何处理为对照组,记为CK;以大球盖菇放入BOPP自发保鲜袋中,记为T1;将由1.5%松针精油和0.2%茶氨酸配制的涂膜剂喷洒于大球盖菇菌柄处,放入BOPP自发保鲜袋中,记为T2;将由1.5%松针精油和0.2%茶氨酸配制的涂膜剂喷洒于大球盖菇菌柄处,放入BOPP自发保鲜袋中,并在保鲜袋中放入吸附剂,记为T3。将所有处理组大球盖菇置于(4±1)℃、RH 85%条件下贮藏10 d,每2 d取样,测定大球盖菇相关指标。

1.2.2 感官评定 对贮藏后的大球盖菇的感官评价采用10分制法^[17],以大球盖菇的色泽、开伞情况、表面黏度、异味是否明显和质地作为评价标准,具体评分标准见表1。

1.2.3 失重率的测定 采用称量法进行测定,使用电子天平将大球盖菇分组称量,通过公式(1)计算得到失重率。

$$\text{失重率}/\% = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

式中, M_0 为样品的原始质量(g), M_i 为样品贮藏*i*天后的质量(g)。

1.2.4 呼吸强度测定 采用果蔬呼吸强度测定仪进行测定,将大球盖菇放入呼吸室35 min,每组测定3次,通过公式(2)计算,取3次的平均值。

表 1 大球盖菇感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for *Stropharia rugosoannulata*

评分 Score	色泽 Color	开伞 Cap opening	表面黏度 Surface viscosity	异味 Off-odor	质地 Texture
8~10	洁白 Pure white	无 None	无 None	无 None	丰满、有弹性 Plump and elastic
5~7	轻微褐变 Slight browning	轻微开伞 Slight cap opening	稍发黏 Slightly sticky	轻微异味 Slight off-odor	稍软、稍有弹性 Slightly soft, still somewhat elastic
2~4	明显褐变 Obvious browning	明显开伞 Obvious cap opening	发黏明显 Clearly sticky	明显异味 Obvious off-odor	变软 Soft
1	褐变严重 Severe browning	严重开伞 Severe cap opening	发黏严重 Severely sticky	严重异味 Strong off-odor	严重软烂 Severely mushy, soft and rotten

呼吸强度/(mg·kg⁻¹·h⁻¹)=

$$\frac{(a \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T}) - (a_0 \times \frac{44}{22.4} \times \frac{273}{273+T_0})}{m \times h} \times \frac{v}{1000} \quad (2)$$

式中，*a* 为测定后 CO₂ 物质的量分数 (μmol·mol⁻¹)，*a*₀ 为测定前 CO₂ 物质的量分数 (μmol·mol⁻¹)，*T* 为测定后温度 (°C)，*T*₀ 为测定前温度 (°C)，*v* 为容器总体积 (dm³)，*h* 为测定所用时间 (h)，*m* 为测定用果蔬的质量 (kg)。

1.2.5 硬度的测定 采用 TMS-Pro 质构仪分别测量大球盖菇的菌盖和菌柄部位硬度，量程 2500 N，形变百分量 50%，测试速度为 60 mm·min⁻¹，起始力为 0.5 N。菌盖和菌柄每组样品均测 3 次，结果取平均值。

1.2.6 褐变指数的测定 采用色差仪测定大球盖菇的 *L*^{*}、*a*^{*}和 *b*^{*}值，使用前先用黑板和白板进行校准。将大球盖菇菌柄切开测定其菌柄中间部位，每组样品测 3 次，利用公式(3)计算得到褐变指数 (BI)，结果取平均值。

BI/%=

$$\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31}{0.172} \times 100 \quad (3)$$

1.2.7 可溶性蛋白含量的测定 参考 Bradford^[18]的方法，采用考马斯亮蓝法测定。准确称量 1.0 g 大球盖菇冷冻干燥样品粉末，添加 6 mL 浓度为 50 mmol·L⁻¹、pH 5.7 的磷酸盐缓冲溶液，经涡旋振荡充分混匀后，于 4 °C 低温条件下以 10 000 r·min⁻¹ 转速离心分离 15 min。移取 0.1 mL 上清液至检测管，加入 0.9 mL 去离子水进行梯度稀释，随后注入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 显色剂，避光静置 3 min 显色后，使用紫外可见分光光度计在 595 nm 特征波长下测定吸光值。利用牛血清白蛋白 (BSA) 制定标

准曲线，根据标准曲线方程推算出待测样品的可溶性蛋白含量。

1.2.8 抗坏血酸 (AsA) 含量的测定 采用分光光度法测定，使用南京建成抗坏血酸试剂盒测定。

1.2.9 总酚含量的测定 采用 Folin 法测定总酚含量^[19]。准确称量 1.0 g 大球盖菇冷冻干燥样品粉末，添加 6 mL 无水乙醇，90 °C 水浴 10 min，于 4 °C 低温条件下以 4200 r·min⁻¹ 转速离心分离 15 min。吸取上清液 0.5 mL，加入 2.5 mL 福林酚试剂，再加入 2 mL 0.75% Na₂CO₃ 溶液，常温放置 35 min 后测定 760 nm 处吸光值。利用没食子酸标准液制作标准曲线，根据标准曲线方程推算出待测样品的总酚含量。

1.2.10 多酚氧化酶 (PPO) 活性的测定 参照 Gao 等^[20]的方法进行测定。准确称取 1.0 g 冷冻粉，加入 6 mL pH 5.7 的 50 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液，经涡旋振荡充分混匀后，于 4 °C 低温离心机以 10 000 r·min⁻¹ 的转速离心 15 min。定量移取上清液 0.5 mL，加入 2.5 mL 100 mmol·L⁻¹ 的邻苯二酚，立刻计时。使用紫外可见分光光度计在 398 nm 特征波长下测定吸光值，每 30 s 记录 1 次，记录 5 min。以 1 min 内吸光值增加 0.1 为 1 个酶活力单位 (U)。

1.2.11 过氧化物酶 (POD) 活性的测定 参照 Li 等^[21]的方法进行测定。酶提取液方法同 PPO。取上清液 0.4 mL，加入 2.3 mL 8 mmol·L⁻¹ 的愈创木酚溶液，再加 0.3 mL 1% 的 H₂O₂ 溶液，立刻计时。使用紫外可见分光光度计在 460 nm 特征波长下测定吸光度值，每 30 s 记录 1 次，记录 5 min。以 1 min 内吸光值增加 0.01 为 1 个酶活力单位 (U)。

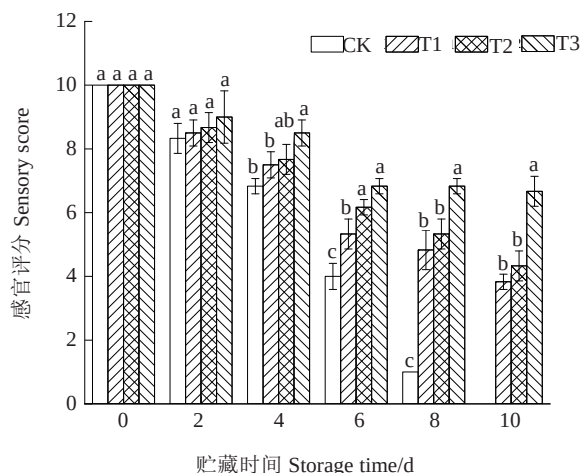
1.3 数据处理

所有试验设置至少 3 个重复，采用 Excel 2010 整理试验数据，采用 SPSS 16.0 进行差异显著性检验，采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大球盖菇感官品质的影响

如图 1 所示,贮藏期间,各处理组大球盖菇的感官评分均呈逐渐下降趋势。其中,对照组在贮藏第 8 天时因出现严重褐变、开伞及组织软化现象,感官评分骤降至 1 分,随即结束贮藏。与对照相比,T1 组(BOPP 袋)、T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)及 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂)均表现出较好的感官品质维持效果。至贮藏第 10 天,T3 处理组的感官品质最佳,仅出现轻微褐变和菌柄软化,感官评分为 6.67 分,较 T1 组和 T2 组分别高出 74.2%和 54.1%,且与二者的差异均达显著水平。因此,采用涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装能够有效延缓大球盖菇的感官品质劣变,从而维持其较好的采后商品性。



注:不同小写字母表示不同处理在同一时间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that different treatments show significant difference at 0.05 level at the same time. The same below.

图 1 不同处理对大球盖菇感官品质的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on sensory quality of *Stropharia rugosoannulata*

2.2 不同处理对大球盖菇失重率的影响

失重率是反映大球盖菇采后水分流失与品质劣变的关键指标。如图 2 所示,各处理组大球盖菇的失重率随着贮藏时间的延长逐渐上升。其中,对照组失重率最高,贮藏至第 8 天时已达到 16.0%。相比之下,T1 组(BOPP 袋)、T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)及 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂),其失重率在整个贮藏期内始终维持在较低水平,且上升幅度较为平缓。至贮藏第 10 天,T1、T2 和 T3 组的失重

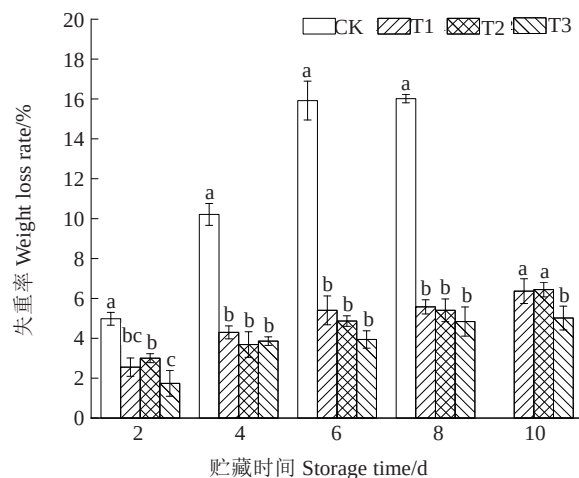


图 2 不同处理对大球盖菇失重率的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on weight loss rate of *Stropharia rugosoannulata*

率分别为 6.3%、6.4%和 5.0%,均明显低于对照组贮藏终点(第 8 天)的 16.0%,且 T1 和 T2 组的失重率显著高于 T3 组。以上结果表明,采用涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装能够有效抑制大球盖菇的呼吸强度与蒸腾作用,从而减少水分损失,延缓失重率的上升。

2.3 不同处理对大球盖菇呼吸强度的影响

呼吸强度反映了果蔬采后生理代谢的活跃程度,过高的呼吸速率往往会加速大球盖菇的后熟进程与组织衰老。由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,各处理组大球盖菇的呼吸强度均呈先升后降再升趋势,且均于第 4 天达到第一次呼吸高峰。在整个贮藏期内,对照组的呼吸强度上升最为明显,峰值为 $28.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,较初始值升高了 87.5%,显著

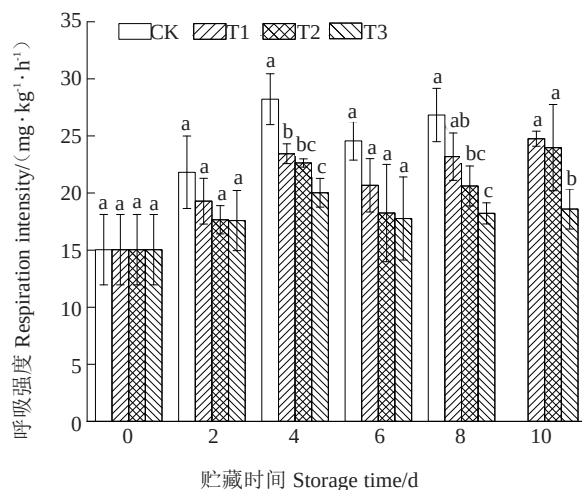


图 3 不同处理对大球盖菇呼吸强度的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on respiration intensity of *Stropharia rugosoannulata*

高于其他处理组;而 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂)的呼吸强度始终维持在较低水平。贮藏 10 d 时,T3 组的呼吸强度分别为 T1 组(BOPP 袋)和 T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)的 74.9%和 77.8%,且与二者差异均达显著水平。以上结果表明,涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装处理能有效抑制大球盖菇的呼吸作用,降低采后代谢损耗,从而延缓其衰老进程。

2.4 不同处理对大球盖菇硬度的影响

贮藏期间各组大球盖菇菌盖与菌柄硬度的变化如图 4-A~B 所示,随着贮藏时间的延长,对照与 T1 组(BOPP 袋)的菌盖硬度逐渐下降,各处理组菌柄硬

度整体呈下降趋势。值得注意的是,T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)和 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂)的菌盖硬度在贮藏第 6 天出现明显回升(图 4-A),随后在第 8、第 10 天分别再度下降,这一现象可能是由涂膜处理使菇体表面水分适度蒸发、菌盖表皮细胞短暂失水收缩、细胞壁密度增加、假性硬度升高所导致的。之后硬度再度下降,则可能与细胞壁整体结构降解有关。在贮藏前期(0~4 d),各组间菌盖和菌柄硬度差异不明显;贮藏 6 d 后,T3 组的菌盖和菌柄硬度均维持在较高水平,T2 组次之,对照组最低。以上结果表明,涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装处理能有效维持大球盖菇的硬度,延缓其质地软化。

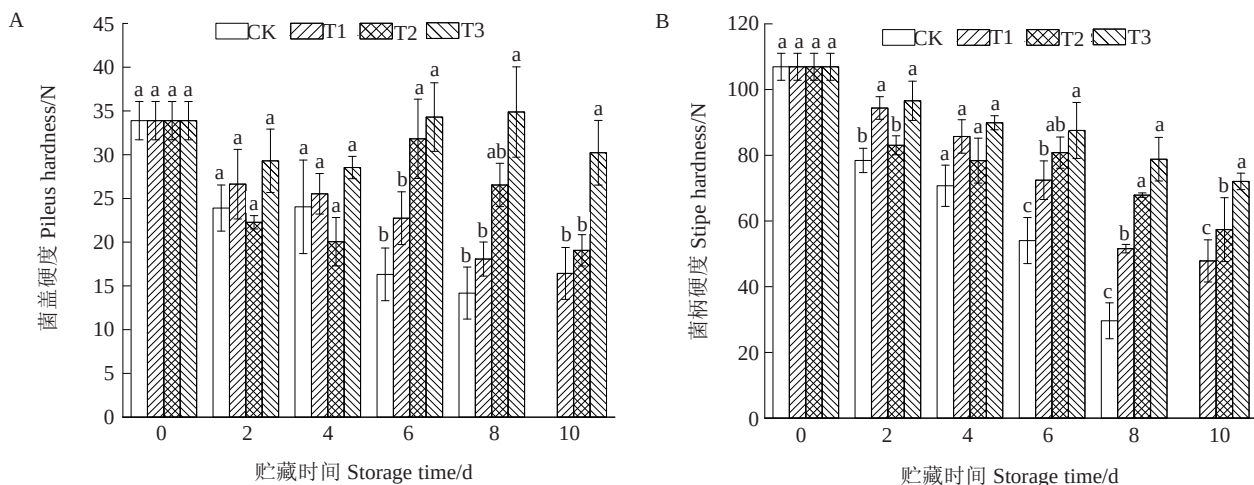


图 4 不同处理对大球盖菇菌盖硬度(A)和菌柄硬度(B)的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on pileus hardness (A) and stipe hardness (B) of *Stropharia rugosoannulata*

2.5 不同处理对大球盖菇褐变指数的影响

色泽是影响消费者购买意愿的重要品质因素,褐变指数(BI)可直观反映大球盖菇的褐变程度,BI 值越高表明褐变越严重。如图 5 所示,随贮藏时间延长,对照组大球盖菇的 BI 值持续上升,贮藏 8 d 时较初始值升高 56.7%。T1 组(BOPP 袋)与 T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)的 BI 值在贮藏前期及中期(0~8 d)保持在较低水平,至贮藏 10 d 时迅速升高;而 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂)的 BI 值在整个贮藏期间始终保持在较低水平,且与对照组差异显著。以上结果表明,涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装处理能有效延缓大球盖菇的褐变进程,保持其良好色泽。

2.6 不同处理对大球盖菇可溶性蛋白、抗坏血酸及总酚含量的影响

如图 6-A 所示,在贮藏期间,各处理组大球盖

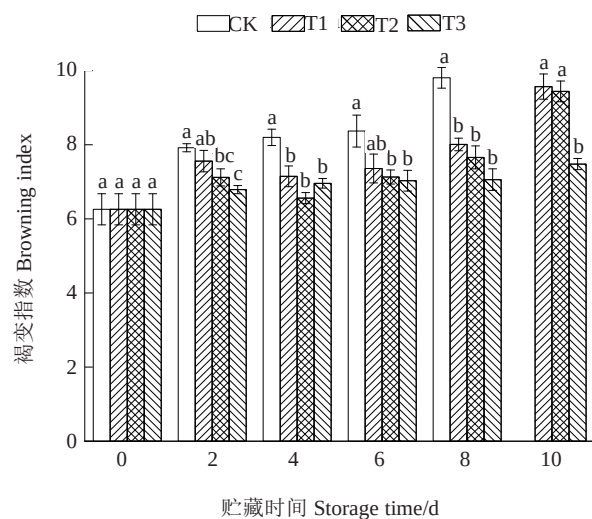


图 5 不同保鲜处理对大球盖菇褐变指数的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on browning index of *Stropharia rugosoannulata*

菇的可溶性蛋白含量整体呈下降趋势,但在贮藏8 d时出现回升。在整个贮藏期内,T3组(BOPP袋+涂膜剂+吸附剂)的可溶性蛋白含量始终维持在较高水平,在贮藏末期,其含量为 $6.42\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,分别较T1组(BOPP袋)和T2组(BOPP袋+涂膜剂)高25.1%和18.4%,且差异显著,而对照组可溶性蛋白含量在整个贮藏期均处于较低水平。

抗坏血酸作为食用菌的重要抗氧化物质,可有效延缓机体衰老与褐变。由图6-B可知,大球盖菇的抗坏血酸含量在整个贮藏期间整体呈下降趋势,但T2组和T3组在贮藏初期(4 d)有明显上升;与对照组相比,各处理组的抗坏血酸含量均得到显著维持,但各处理组之间无显著差异。

酚类物质同样具有抗氧化性,是食用菌的重要营养成分之一。由图6-C可知,贮藏期间大球盖菇

的总酚含量变化相对平稳,呈波动下降趋势;贮藏第2天,T2组和T3组的总酚含量出现缓慢上升;贮藏第8天时,各处理组总酚含量均出现不同程度回升,其原因可能是大球盖菇在衰老胁迫下的应激性响应,随着贮藏后期细胞膜脂过氧化加剧,苯丙烷代谢途径被再次激活,诱导酚类物质重新合成以清除过剩自由基,属于衰老后期的补偿性抗氧化反应。以上结果表明,BOPP自发气调保鲜处理可有效维持大球盖菇的可溶性蛋白、抗坏血酸及总酚含量,且涂膜剂与吸附剂能协同增强这一保鲜效果。

2.7 不同处理对大球盖菇PPO和POD活性的影响

PPO是导致大球盖菇褐变的关键酶之一,其活性下降可有效减缓褐变进程。如图7-A所示,各组大球盖菇PPO活性随贮藏时间延长逐渐下降,至贮藏后期趋于稳定。贮藏前期(4 d),T1、T2、T3处理

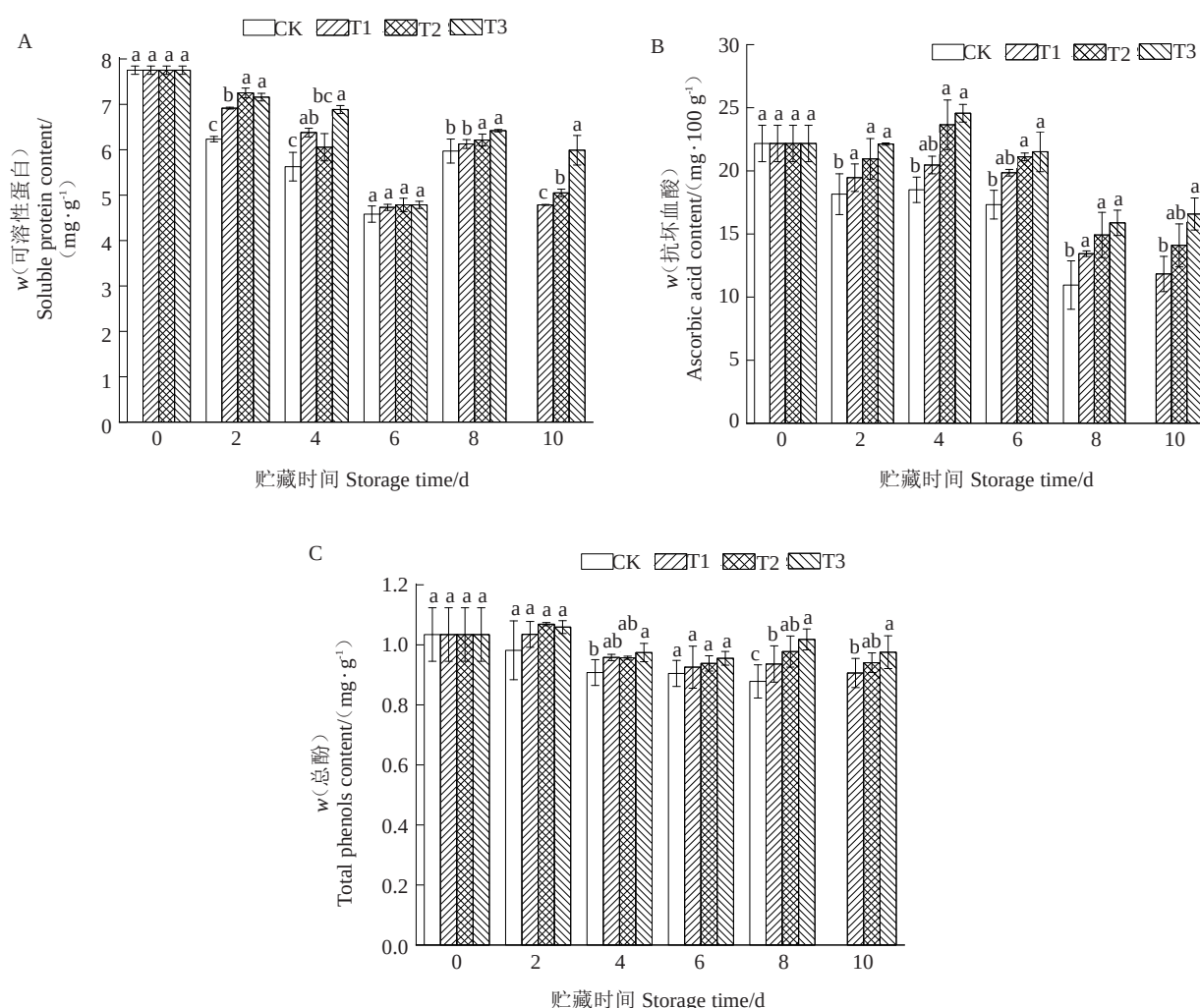


图6 不同保鲜处理对大球盖菇可溶性蛋白(A)、抗坏血酸(B)及总酚(C)含量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on soluble protein (A), ascorbic acid (B) and total phenolic (C) content of *Stropharia rugosoannulata*

间 PPO 活性无显著差异;贮藏中后期,对照组 PPO 活性显著高于 T2 组(BOPP 袋+涂膜剂)和 T3 组(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂);贮藏 10 d 时,T1 组(BOPP 袋)PPO 活性最高,T2 组次之,T3 组活性最低,且组间差异显著。以上结果表明,自发气调包装、松针精油涂膜及吸附剂处理均可不同程度抑制 PPO 活性,三者协同作用能更有效减缓大球盖菇的酶促褐变。

POD 作为一种抗氧化酶,同时对酶促褐变具有促进作用。由图 7-B 可知,各组大球盖菇的 POD 活性呈波动下降趋势。在整个贮藏期间,对照组 POD 活性最高,T3 组始终处于最低水平,两者差异显著;T1 组与 T2 组居于对照和 T3 组之间,且两者间无显著差异。以上结果表明,涂膜剂与吸附剂协同 BOPP 自发气调包装处理能有效抑制 POD 活性,进一步延缓大球盖菇的酶促褐变。

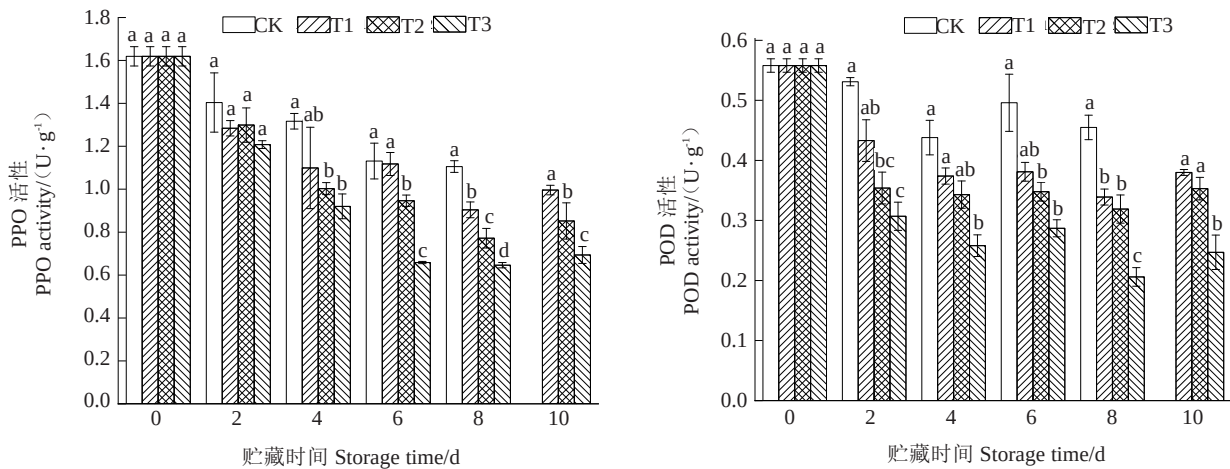


图 7 不同保鲜处理对大球盖菇 PPO(A)和 POD(B)活性的影响
Fig. 7 Effects of different treatments on PPO (A) and POD (B) activity of *Stropharia rugosoannulata*

3 讨论与结论

大球盖菇采后呼吸代谢旺盛、失水迅速,易出现褐变、软化及营养品质下降等问题。本研究比较了 BOPP 自发气调包装(T1)、协同松针精油-茶氨酸涂膜(T2)及进一步添加吸附剂(T3)三种处理对大球盖菇的保鲜效果。结果表明,三种处理均能不同程度延缓大球盖菇品质劣变,其中 T3 处理(BOPP 袋+涂膜剂+吸附剂)效果最优。

褐变是限制大球盖菇商品价值的关键因素,主要由 PPO 和 POD 催化酚类物质氧化引起。在本研究中,T2 和 T3 处理组 PPO 和 POD 活性明显低于 T1 组和对照,同时总酚含量维持较高水平,说明涂膜处理有效抑制了酶促褐变进程。这主要归因于松针精油与茶氨酸的协同抗氧化作用,松针精油富含萜类、酚类等脂溶性抗氧化成分,可渗透至细胞膜脂双层,抑制膜结合型 PPO 的活性释放^[11,22],而茶氨酸则作为水溶性自由基清除剂,可螯合金属离子、阻断酚类氧化的链式反应^[13-14],二者复配实现了脂溶性与水溶性抗氧化通路的互补。此外,松针精油的抑菌活性^[22]可抑制菌柄基部气生菌丝的萌发,

从而延缓菌柄老化和质地软化,维持较高的菌柄硬度。在贮藏后期,T2 和 T3 组可溶性蛋白和抗坏血酸含量显著高于对照组,进一步佐证了涂膜处理对细胞氧化损伤的保护作用。值得注意的是,T3 组在营养指标维持上略优于 T2 组,可能与吸附剂改善微环境后间接减轻了细胞氧化胁迫有关。

BOPP 包装通过限制气体交换形成高 CO₂、低 O₂ 的自发气调环境,可有效抑制呼吸强度和蒸腾失水^[23]。但单一气调包装存在局限性,包装内湿度过高易导致表面发黏,乙烯积累会加速衰老,O₂ 过度消耗则可能诱发无氧呼吸。本研究中 T1 组在贮藏后期(8~10 d)褐变指数迅速升高,感官评分明显下降,即反映了这一问题。吸附剂的加入(T3 组)有效弥补了上述缺陷,本研究所用吸附剂中,硅胶与活性氧化铝吸收多余水分,降低了包装内相对湿度,抑制了微生物滋生和表面黏腻感,高锰酸钾可氧化乙烯等挥发性代谢产物,延缓衰老进程^[24-26];分子筛选择性吸附 CO₂ 和氨气,防止 CO₂ 过高导致无氧呼吸^[15]。因此,T3 组呼吸强度峰值(第 4 天)显著低于 T1 组,且贮藏末期(10 d)呼吸强度仅为 T1 组的 74.9%,表明吸附剂有效维持了包装内气体稳态。

气调微环境的改善还间接影响了菇体质地,T2和T3组菌盖硬度在贮藏第6天出现短暂回升,可能与吸附剂调控湿度后细胞壁代谢的短暂激活有关;而T3组菌柄硬度在整个贮藏期下降最慢,说明吸附剂通过延缓细胞壁降解酶活性上升而保护了组织完整性。

综合来看,T3处理(BOPP袋+松针精油-茶氨酸涂膜+吸附剂)通过主动抗氧化与被动气调的双重协同,显著抑制大球盖菇采后呼吸强度和失重率升高,保持菌盖与菌柄的良好硬度,延缓褐变指数的增大,抑制PPO和POD活性,并对可溶性蛋白、抗坏血酸及总酚等营养成分含量表现出较好的维持作用。本研究为BOPP袋协同松针精油-茶氨酸涂膜及吸附剂在大球盖菇采后保鲜中的应用提供了理论依据,但该处理在基于包装内气体浓度及细胞超微结构变化的进一步协同作用机制方面尚需进一步探究。

参考文献

- [1] 萨仁图雅,图力古尔.大球盖菇研究进展[J].食用菌学报,2005,12(4):57-64.
- [2] Liu Y T, Sun J, Luo Z Y, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5):1238-1244.
- [3] Li W, Chen W C, Wang J B, et al. Structure-activity relationship of novel ACE inhibitory undecapeptides from *Stropharia rugosoannulata* by molecular interactions and activity analyses[J]. Foods, 2023, 12(18):3461.
- [4] 饶克诚,黄文,王益,等.贮藏温度对大球盖菇采后品质和挥发性风味成分影响[J].食品工业科技,2023,44(11):369-378.
- [5] 金玮玲,高虹,范秀芝,等.气调包装技术在食用菌保鲜中的研究进展[J].保鲜与加工,2017,17(6):126-131.
- [6] 陶海霞,于安芬,白滨,等.焦亚硫酸钠对双孢蘑菇鲜品颜色和质量安全性的影响[J].甘肃农业科技,2019(4):23-31.
- [7] 王悦.松茸保鲜技术的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [8] 亢瑞琪.气调复合保鲜技术对杏鲍菇和羊肚菌采后品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2024.
- [9] 陈笑冰,包宇航,黄文艺,等.荔枝采后贮藏中保鲜剂的研究进展[J].食品与发酵工业,2025,51(18):389-398.
- [10] Zambrano-Zaragoza M L, Ricardo G R, Nestor M M, et al. Nanosystems in edible coatings: A novel strategy for food preservation[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(3):705.
- [11] 潘晓翠,成宏斌,王帆林,等.三种复配生物保鲜剂处理对红毛丹贮藏效果的影响[J].保鲜与加工,2023,23(6):1-9.
- [12] 郝金伟,张国锋,容井容,等.松针精油的提取及开发利用的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2018,9(23):6118-6123.
- [13] 马美湖.茶多酚复合剂对实验动物抗性效果与机理研究[D].长沙:湖南农业大学,2005.
- [14] Adhikary R, Mandal V. L-theanine: A potential multifaceted natural bioactive amide as health supplement[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2017, 7(9):842-848.
- [15] 侯美玲,段华伟,胡长鹰.活性气调包装对番木瓜品质的影响[J].食品工业科技,2011,32(2):280-282.
- [16] 康超,杨玲,王芳,等.白鬼笔(冬荪)气调贮藏技术研究[C]//中国菌物学会.多彩菌物 美丽中国-中国菌物学会2019年学术年会论文摘要,2019:299.
- [17] 刘鑫燕,李占峰,彭帮柱.大球盖菇腐败真菌的分离、鉴定及生长特性研究[J].食品工业科技,2024,45(9):131-139.
- [18] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72:248-254.
- [19] Jiang T J, Zheng X L, Li J R, et al. Integrated application of nitric oxide and modified atmosphere packaging to improve quality retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4):1693-1699.
- [20] Gao M S, Feng L F, Jiang T J. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 149:107-113.
- [21] Li R R, Zheng Q W, Lu J L, et al. Chemical composition and deterioration mechanism of *Pleurotus tuoliensis* during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2021, 338:127731.
- [22] 刘文丽,包怡红.松针精油的协同抑菌效应及机制[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(2):98-104.
- [23] 李圣杰,郑素慧,韩蓉,等.气调包装对精河枸杞鲜果采后品质的影响[J].新疆农业科学,2024,61(12):2987-2996.
- [24] 仓素霞,李洁,严守雷,等.不同种类吸附剂对新鲜板栗仁的保鲜研究[J].中国林副特产,2008(2):27-29.
- [25] 巴良杰,马立志,余磊,等.乙醇熏蒸结合乙烯吸附剂对蓝莓保鲜效果的影响[J].包装工程,2019,40(19):66-72.
- [26] 秦芝璇,史馥毓,黎治伶,等.PBAT气调保鲜膜的制备及其在血橙保鲜中的应用[J].西南大学学报(自然科学版),2025,47(6):90-101.