

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.202423.0577

# 食用菌色泽劣变控制技术研究进展

史 慧<sup>1</sup>, 王安建<sup>2</sup>, 崔国梅<sup>2</sup>, 刘丽娜<sup>2</sup>, 李顺峰<sup>2</sup>

(1. 驻马店市农业对外合作交流中心 河南驻马店 463000; 2. 河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002)

**摘要:** 食用菌色泽劣变控制技术是食用菌在贮藏保鲜及加工过程中的共性关键环节,其目的是缓解菇体因褐变及微生物污染等造成的色泽劣变及品质下降。常见的方法有物理方法、化学方法、生物方法等,对色泽劣变影响因素及各种控制技术进行了分析和综述,并提出了食用菌色泽劣变控制方面存在的相关问题及建议,以期食用菌贮藏保鲜及加工提供技术参考。

**关键词:** 食用菌; 色泽劣变; 影响因素; 控制技术

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)06-009-09

## Research progress on control technology for color deterioration of edible fungi

SHI Hui<sup>1</sup>, WANG Anjian<sup>2</sup>, CUI Guomei<sup>2</sup>, LIU Li'na<sup>2</sup>, LI Shunfeng<sup>2</sup>

(1. Zhumadian Agricultural Foreign Cooperation and Exchange Center, Zhumadian 463000, Henan, China; 2. Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** The color deterioration control technology of edible fungi is a key link in the process of storage, preservation and processing, and its purpose is to alleviate the color deterioration and quality decline caused by browning and microbial pollution. The common methods include physical method, chemical method, biological method and biological technology, and so on. In this paper, the influencing factors and various control technologies of color deterioration are analyzed and reviewed. The relevant problems and suggestions for the control of color deterioration are put forward, which will provide technical reference for the storage, preservation and processing of edible fungi.

**Key words:** Edible fungi; Color deterioration; Impact factor; Control technology

食用菌以丰富的营养、良好的口感风味及一定的药用价值而备受推崇。据中国食用菌协会统计,2022年全国食用菌鲜品产量为4 222.54万t,比2021年增长了2.14%;2022年食用菌总产值3 887.22亿元,比2021年增长了11.84%<sup>[1]</sup>。然而,食用菌采后代谢旺盛,易导致老化开伞、褐变、腐烂,采摘及运输过程中的机械损伤易造成微生物污染及色泽劣变,加工过程中原料管理、工艺条件及护色不当也是造成产品色泽劣变的重要因素。即在贮藏保鲜及加工过程中,由代谢作用、机械损伤、工艺条件不当等因素引起的色泽劣变是食用菌经济效益和品质下降的重要原因。

通常酶促褐变、非酶促褐变及微生物污染等都是食用菌色泽劣变的常见原因,而酶促褐变为保鲜

阶段色泽劣变的主要原因<sup>[2-3]</sup>,非酶促褐变为加工贮藏阶段的主要诱因。酶促褐变主要是指在氧气存在的条件下,食用菌中的酚类物质在多酚氧化酶(PPO)的酶促反应下被氧化形成醌,经醌的自发聚合后,与氨基酸残基侧链基团发生反应,最终形成褐色素<sup>[4-6]</sup>。非酶促褐变主要是指食用菌中还原糖、醛类、酮类等羰基化合物与氨基酸、多肽或者蛋白质等氨基化合物在热作用下发生的反应<sup>[7]</sup>。此外,微生物侵染可引发食用菌产生细菌性褐斑病,使其色泽变深,发生褐变并腐烂。因此,食用菌色泽劣变控制方面的研究必不可少。

由于食用菌色泽劣变的影响因素较多,以往研究主要集中在食用菌贮藏保鲜相关的酶促褐变方面,而对非酶促褐变、微生物污染及深加工造成的

收稿日期:2023-09-04;修回日期:2024-03-20

基金项目:河南省科技攻关计划项目(242102111068,232102110278);河南省农业科学院自主创新项目(2023ZC079)

作者简介:史 慧,女,高级农艺师,研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail:sh730415@163.com

通信作者:王安建,男,研究员,研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail:jgs1525@126.com

色泽劣变研究较少,笔者基于食用菌贮藏保鲜及深加工技术,列举了食用菌色泽劣变的影响因素(温度、氧含量、水分含量、pH、微生物侵染、机械损伤等)及控制技术(物理方法、化学方法、生物方法等),最后对食用菌色泽劣变控制方面存在的相关问题及建议进行了分析,以为食用菌贮藏保鲜及加工提供参考。

### 1 影响食用菌色泽劣变的因素

食用菌色泽劣变主要由于酶促褐变、非酶促褐变及微生物侵染等引起的色泽改变进而品质下降,而温度、氧气、水分含量、pH值、机械损伤、微生物污染等都是造成食用菌褐变及菌斑产生的重要因素,也是抑制食用菌色泽劣变的控制条件,如图1。

#### 1.1 温度

温度通过影响抗氧化酶如过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等的活性而影响食用菌的色泽<sup>[8-9]</sup>。诸多研究表明,在一定范围内温度越高,杏鲍菇<sup>[10]</sup>、双孢菇<sup>[11]</sup>、猴头菇<sup>[12]</sup>等食用菌的PPO、POD等的活性越强,微生物生长繁殖加速,褐变越严重。对于食用菌贮藏保鲜及非热加工,不同的研究者针对不同原料采用不同的工艺及指标,得出的结论却较为一致:即在一定温度范围内,酶活性会随温度的升高而增强,导致其褐变程度加深。

低温冷藏可在一定程度上抑制菇体的酶活性,降低代谢水平,但温度过低可能导致食用菌出现冷害,尤其是草菇,在温度低于5℃会出现渗水现象。因此,低温贮藏虽可减缓食用菌褐变,但需预防冷害的发生。

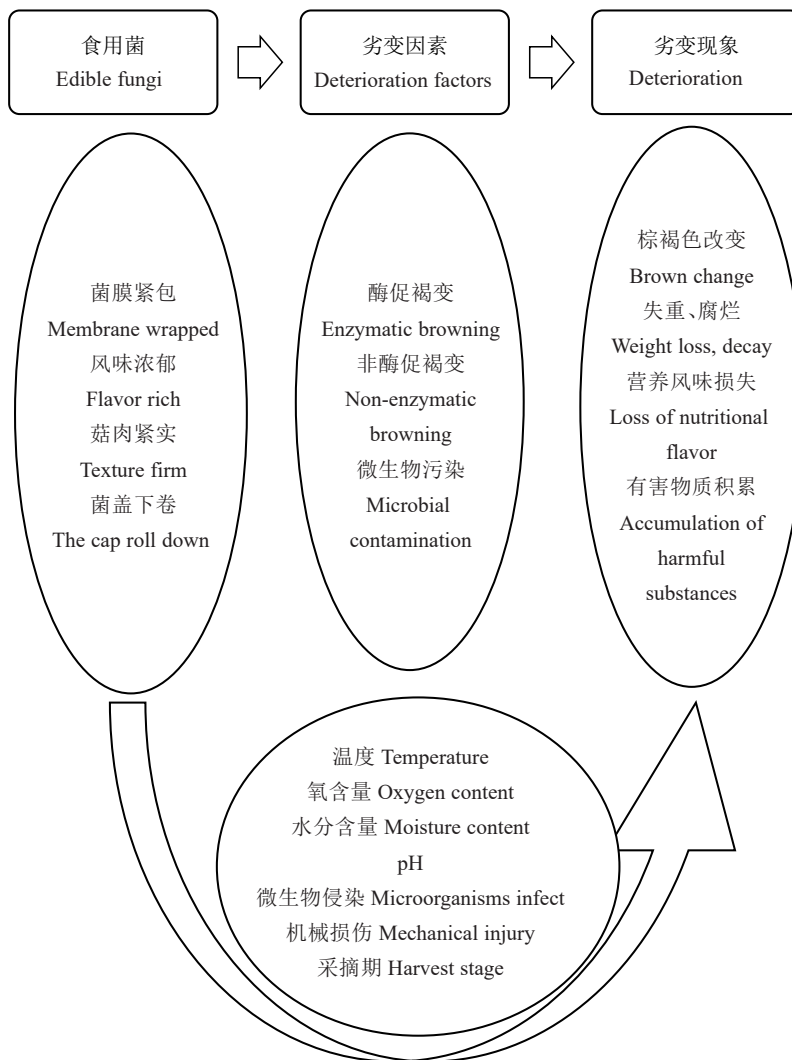


图1 食用菌色泽劣变影响因素

Fig. 1 Influencing factors of color deterioration of edible fungi

## 1.2 氧气

酶促褐变是导致食用菌贮藏保鲜加工过程中色泽劣变的关键因素,而氧气的存在是发生酶促褐变的必要条件。褐变对浅色食用菌(如白平菇、双孢菇、猴头菇)的商品价值影响较大。因此,降低活性氧含量是抑制食用菌酶促褐变的有效方法,是抑制色泽劣变的有效手段。

## 1.3 含水量

食用菌失水后会引发菇体收缩、菌帽卷曲或折断、细胞木质化、色泽和风味受损等。王玉迪<sup>[13]</sup>研究了热泵处理不同水分损失对香菇色泽的影响,结果表明,20℃贮藏温度下,失水10%可有效抑制香菇的采后褐变。也就是说,虽然水分损失在一定程度上可导致食用菌品质下降,但适当失水却可有效抑制酶促褐变。

## 1.4 pH值

pH值对酶活性及微生物活动均有一定的影响。大多数微生物活动的最适pH值为6.0~7.5,pH值过高或过低都会抑制其生理活动,而微生物过多则导致食用菌出现菌斑及褐变,从而影响其品质<sup>[14]</sup>。但造成新鲜食用菌褐变的PPO最适pH值为4.0~5.0,在pH值<2.5及pH值>10.0的条件下,酶活性位点结构发生改变以致酶几乎完全失活<sup>[15]</sup>。因此,控制合适的pH值是降低褐变程度的重要途径。

## 1.5 机械损伤

在采收、运输及加工过程中受到的机械损伤是导致食用菌褐变的主要因素之一<sup>[16-17]</sup>。机械损伤破坏了细胞结构引起细胞膜破裂,在有氧条件下,酚类底物与PPO接触被氧化成醌类物质,并发生氧化聚合反应,最终形成褐色素<sup>[18]</sup>。陈代良等<sup>[19]</sup>通过振动胁迫来模拟双孢菇运输过程中遭受的机械损伤,结果表明,处理组的褐变度为未经振动对照组的1.57倍,这表明机械损伤导致了双孢菇发生氧化褐变。通常,食用菌在生长过程中酚类物质含量随时间的延长而降低,但采收、采后或加工过程中遭受机械损伤,则可诱发酚类物质含量升高,从而导致褐变,而褐变后的食用菌不再适合贮藏保鲜,一般用来生产罐头或者进一步的深加工。

## 1.6 微生物

高温高湿条件为食用菌生长提供了基础,但也为微生物生长繁殖提供了适宜的环境,食用菌组织裸露无保护,代谢旺盛,更易遭受微生物侵染从而发生细菌性褐斑病,致使其色泽加深、发生褐变并

腐烂。假单胞菌属细菌是引发食用菌产生细菌性褐斑病的主要因素,它能够导致金针菇<sup>[20]</sup>、双孢菇、杏鲍菇、平菇等食用菌发生细菌性褐斑病。相关研究表明,托拉斯假单胞杆菌为双孢菇细菌性褐斑病的主要致病菌<sup>[21-22]</sup>,恶臭假单胞菌为杏鲍菇褐腐病致病菌<sup>[23]</sup>,解淀粉芽孢杆菌是平菇黄斑病的病原菌<sup>[24]</sup>。食用菌采后品质下降的速度与初始微生物数量有一定关系,微生物初始含量高更容易导致食用菌褐变及出现菌斑等变质现象<sup>[14]</sup>。此外,除了托拉斯假单胞杆菌、恶臭假单胞菌、解淀粉芽孢杆菌外,酵母菌、木霉菌、毛霉菌等竞争性杂菌及其他真菌、细菌等病原菌都是造成食用菌污染的重要因素<sup>[25]</sup>。因此,防止微生物污染是减少食用菌色泽劣变的有效手段。

## 2 食用菌色泽劣变控制技术

### 2.1 物理方法

物理技术主要通过抑制、钝化酶活性或者降低氧含量等方法来减缓食用菌色泽劣变,常见的有低温贮藏、气调贮藏、辐射技术、电解水护色等鲜菇护色方法及热烫处理结合添加剂等加工护色方法。

**2.1.1 低温手段** 低温有助于降低菇体内的酶活力及抑制微生物生长,从而抑制与酶有关的褐变及微生物感染导致的菌斑。低温操作简单且效果好,作为贮藏保鲜的基础措施,一般与其他技术配套使用。不同食用菌最佳贮藏温度有所不同,一般在0~5℃,金针菇适宜的贮藏温度是5℃,香菇和秀珍菇为4℃,草菇等高温食用菌温度会更高一些,其最适温度在13℃,低于10℃会遭遇冷害<sup>[26]</sup>。低温护色技术需建配套的冷链设施,能耗较大,且需加强冷链管理,减少温度波动对食用菌造成的损伤。

**2.1.2 气调控制** 气调控制技术主要通过调节贮藏环境中O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等气体含量来调节菇体中与褐变相关酶的生理活动,以期达到护色效果。高氧时会增强食用菌的呼吸作用并加快其衰老,而高CO<sub>2</sub>浓度可抑制细菌及真菌的生长,减弱部分酶活性,从而延缓食用菌品质劣变。刘莎莎<sup>[27]</sup>研究表明,平菇在15℃、90% O<sub>2</sub>和10% CO<sub>2</sub>的贮藏条件下,褐变相关的酶如PPO、PAL及CAT等活性显著提高,O<sub>2</sub><sup>-</sup>与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>积累有所降低。气调护色技术虽可在缺氧的情况下延长食用菌贮藏期,但过度缺氧则会发生异味等不良反应,且设备投资相对较大,不利于产地保鲜。此外,在食用菌贮藏保鲜过程中还需综合衡量气调参数以及贮藏温度,谨防褐变发生。



**2.1.3 热烫处理** 热烫处理主要发生在食用菌加工前处理阶段,食用菌经热处理可以钝化与褐变有关的酶如 PPO、PAL 及 CAT 等,除去菇体组织中的  $O_2$ ,并减少微生物数量,在一定程度上可以延缓褐变、减少菌斑以达到抑制色泽劣变的目的。Lespinaud 等<sup>[28]</sup>分别采用 50、60、70、80 和 90 °C 的水烫漂双孢菇,结果发现,菇体中 PPO 失活时间随烫漂温度的升高而逐渐降低,50 °C 下烫漂 35.83 min 则 PPO 的活性降低 50%,而 90 °C 下烫漂 7 min 时 PPO 全部失活。李君兰等<sup>[29]</sup>发现,采用 95 °C 热烫鸡腿蘑 3 min 即可使氧化酶类全部失去活性,且最大限度地保持菇体组织结构。大量此类研究表明,随着热烫温度的升高和热烫时间的延长,褐变相关酶类活性逐渐降低至失活。生产上主要采取热水烫漂、蒸汽烫漂等热处理方式,操作方便简单,经济实用,效果显著,是食用菌加工常用的有效方法。

**2.1.4 辐射技术** 辐射技术是利用射线或光照辐射食用菌,杀死菇体表面微生物,抑制酶活性及生理代谢,降低酶促褐变及因微生物污染而产生的菌斑,从而达到抑制色泽劣变的目的。Lei 等<sup>[30]</sup>利用辐照剂量  $1.0 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$  的短波紫外线辐照双孢菇,可明显降低其褐变度。短波紫外线通过降低 PPO 活性及与褐变相关的基因转录水平来抑制褐变。李娜<sup>[31]</sup>研究发现,在 15 °C、300 W、40 kHz、脉冲 50% 超声波条件下处理草菇 10 min,草菇的褐变度显著降低,细胞内色素酶活性也受到一定程度的抑制。

辐射护色技术具有无残留、时间短、效果好等优点,但需合理控制剂量和时间,避免辐射过度造成食用菌品质下降。此外,辐射技术运行成本较高,对设备操作和人员技术要求也高,并存在辐射泄漏等风险,阻碍了该项技术的推广应用。强化辐射护色技术与其他护色技术的协同应用研究,同时对相关设备仪器进行开发,简化操作,提升安全性能,降低运行成本,助力其推广及应用。

**2.1.5 电解水方法** 电解水主要是通过电解盐或者稀盐酸获得的有特殊功能的酸性或碱性电解水的总称<sup>[32]</sup>。电解盐或者稀盐酸获得的电解水可以降低双孢菇的褐变指数及菌落总数,有效延缓褐变<sup>[33-34]</sup>,而其抑菌活性主要取决于次氯酸、氧化还原电位及其协同作用。电解水腐蚀性小,且可被自来水稀释还原为普通水<sup>[35-36]</sup>,对环境及食品的破坏作用较小。电解水技术因绿色、安全、有效等优势受到研究者一定程度的青睐。

## 2.2 化学方法

化学技术主要是通过添加护色剂螯合酶的活性辅基或替代酶活性位点的氨基酸残基、改变酶作用的 pH、或通过去除菇体表面的氧气及导致色泽劣变的作用底物,以期达到控制色泽劣变的目的<sup>[37]</sup>。目前使用较多的护色剂主要有抗坏血酸及其盐类、L-半胱氨酸、柠檬酸、乙醇等。但单一护色剂效果不佳或者容易超标,通常会对其进行复配,借助复合化学保鲜剂几种成分的协同增效作用,以防单一成分过量添加,同时提升护色效果(表 1~2)。

## 2.3 生物方法

生物方法一般是通过喷雾、浸渍等手段将一些生物护色剂附着于食用菌表面,风干后形成的保护膜可减少机械损伤及菇体的水分流失,抑制呼吸作用,延缓衰老褐变,抑制微生物繁殖,防止菌斑产生,具有天然、安全等优点。

**2.3.1 动物源护色剂** 动物源护色剂是指从动物体内提取或由动物分泌的天然成分,具有一定的杀菌防腐、抑制褐变等功能,具有无毒副作用、来源广泛等特点。目前,壳聚糖及蜂胶被广泛应用于食用菌护色剂中。

壳聚糖是甲壳素脱乙酰基的产物,具有成膜性好、安全可降解、吸湿性强等特点,对细菌、真菌、霉菌都有较好的抑菌性,可用于食用菌涂膜保鲜,对香菇<sup>[48]</sup>、杏鲍菇<sup>[49]</sup>等食用菌均有一定的护色功能。李艳杰等<sup>[48]</sup>研究发现,用 1% 壳聚糖处理香菇可以显著降低香菇的褐变程度。Liu 等<sup>[49]</sup>研究表明,原儿茶酸接枝壳聚糖溶液涂膜杏鲍菇,贮藏 15 d,外观色泽较好,而对照组的色泽劣变严重。壳聚糖的护色机制,其一可能是壳聚糖通过抑制微生物的生长繁殖来抑制菌斑的产生;其二可能是其成膜作用阻止了气体交换,在一定程度上减缓褐变反应。

蜂胶以良好的成膜性阻碍气体交换、抑制新陈代谢、减少水分蒸发,从而减缓色泽劣变,此外蜂胶还对微生物具有抑制或杀灭作用,从而减少菌斑的产生。杨鑫等<sup>[50]</sup>研究表明,蜂胶提取液对杏鲍菇及污染菌有抑制作用,添加适量蜂胶提取液,可有效抑制细菌污染,从而减少菌斑产生,但其对霉菌的抑制能力较差。蜂胶的护色机制,其一可能是其所含的化合物如不饱和酮、醇、烯类及咖啡酸、苯乙酯等可通过抑制羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 、超氧自由基 $\cdot\text{O}_2^-$ 、清除活性氧等而起一定的抗氧化作用;其二可能是其良好的成膜性阻止了气体交换,减缓酶促褐变。

**2.3.2 植物源护色剂** 植物源护色剂是从植物体

表 1 常见护色剂及其作用机制  
Table 1 The common color protectants and their action mechanism

护色剂 Color protectant	护色机制 Color protection mechanism	研究实例 Case study
抗坏血酸 Ascorbic acid	<p>一是与 PPO 的辅基络合,直接作用酶;二是较强的还原性可减少氧含量,抑制 PPO 活性,阻断褐色物质生成,抑制褐变降低色泽劣变。</p> <p>Firstly, Ascorbic acid could complex with the coradical of PPO and directly acted on the enzyme. Secondly, The strong reducibility of ascorbic acid could reduce the oxygen content, inhibit the activity of PPO, block the formation of brown matter, inhibit browning and reduce color deterioration.</p>	<p>抗坏血酸质量分数为 0.04%时,草菇的褐变度最低;抗坏血酸浓度为 <math>0.04 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}</math> 时,对双孢菇的护色效果显著<sup>[36-38]</sup>。</p> <p>When the concentration of ascorbic acid was 0.04%, the browning degree of <i>Volvariella</i> was the lowest, and when the concentration of ascorbic acid was <math>0.04 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}</math>, the color protection effect of <i>Agaricus bisporus</i> was significant.</p>
柠檬酸 Citric acid	<p>降低 pH、螯合金属离子、降低 PPO 的活性,还具有增强抗氧化剂的抗氧化能力。</p> <p>It could reduce pH, chelate metal ions, reduce the activity of PPO, and enhance the anti-oxidation ability of antioxidants.</p>	<p>柠檬酸质量浓度在 <math>0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}</math> 时双孢菇的护色效果最好;柠檬酸质量分数为 1.0%时双孢菇的褐变度最低<sup>[38-39]</sup>。</p> <p>When the concentration of citric acid was <math>0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}</math>, the color protection effect of <i>Agaricus bisporus</i> was the best, and the browning degree of <i>Agaricus bisporus</i> was the lowest when the concentration of citric acid was 1.0% .</p>
乙醇 Ethanol	<p>通过抑制褐变及减少菌斑来抑制色泽劣变。一是乙醇熏蒸降低与褐变相关的 PPO、POD、PAL 等的活性及底物总酚的含量,抑制酶促褐变;二是抑制游离氨基酸及还原糖含量的上升,抑制菇体由羰氨反应、维生素 C 的降低及失水率的上升等引起的非酶促褐变;三是抑制微生物的生长,减少了褐斑病的产生。</p> <p>It could inhibit color deterioration through the inhibition of browning and reduce plaque. Firstly, ethanol fumigation could decrease the activities of PPO, POD, PAL and the content of total phenol in substrate, and then inhibit the enzymatic browning. Secondly, it could inhibit the increase of free amino acid, reduce sugar, and inhibit the non-enzymatic browning caused by carbonyl ammonia reaction, the decrease of vitamin C and the increase of water loss. Thirdly, It could inhibit the growth of microorganisms and reduce the occurrence of brown spot.</p>	<p>用 <math>400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}</math> 乙醇熏蒸处理的双孢菇具有较好的色泽;用 <math>400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}</math> 的乙醇熏蒸双孢菇 3 h,白度较好<sup>[40-41]</sup>。</p> <p>The <i>Agaricus bisporus</i> treated with <math>400 \text{ mL}^{-1}</math> ethanol had better color and whiteness, while the <i>Agaricus bisporus</i> treated with <math>400 \text{ mL}</math> ethanol for 3 h had better whiteness.</p>
L-半胱氨酸 L-cysteine	<p>通过抑制褐变来降低色泽劣变。一是 L-半胱氨酸含有的-SH 可结合氧化生成的醌类物质,抑制其进一步形成黑色素,从而抑制褐变反应。二是 L-半胱氨酸可以抑制 POD、PPO 活性,减少丙二醛(MDA)以及总酚含量的积累,从而延缓褐变。</p> <p>Browning was inhibited by reducing color deterioration. Firstly, the-SH contained in L-cysteine could bind to quinones formed by oxidation and inhibit the further formation of melanin, thus inhibiting the browning reaction. Secondly, L-cysteine could inhibit the activities of POD and PPO, decrease the accumulation of MDA and total phenol, and delay browning.</p>	<p>L-半胱氨酸质量分数为 0.50% 时褐变程度最低且趋于平缓<sup>[39,42-43]</sup>。</p> <p>When the concentration of L-cysteine reached 0.50%, the browning degree was the lowest and tended to be gentle.</p>
二氧化氯 Dioxidochlorine	<p>通过渗透及氧化细胞表面的定位蛋白来提高细胞膜的通透性,氧化及破坏 DNA、RNA 和蛋白等,影响微生物代谢活动,抑制 PPO 活性,推迟 PPO 和 POD 活性高峰的出现,从而延缓褐变并有效抑制色泽劣变。</p> <p>Though infiltrating and oxidizing localized proteins on the cell surface, it could enhance cell membrane permeability oxidize and destroy DNA, RNA and proteins, affect microbial metabolism activity, inhibit PPO activity, delay the peak of PPO and POD activity, and oxidizing localized proteins on the cell surface. Therefore, browning was delayed and color deterioration was restrained effectively.</p>	<p>贮藏温度 <math>4 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>, 二氧化氯质量浓度: <math>150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}</math> 浸泡 10 min, 双孢菇护色效果最佳<sup>[44]</sup>。</p> <p>The best color-protecting effect of <i>Agaricus bisporus</i> was obtained by soaking at <math>4 \text{ }^{\circ}\text{C}</math> and <math>150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}</math> dioxidochlorine for 10 min.</p>

表2 复合护色剂及其效果

Table 2 The compound color protectants and their effects

复合护色剂 Compound color protectant	配比及工艺参数 Ratio and process parameters	保鲜效果 Fresh-keeping effect
脯氨酸+组氨酸+维生素 C+EDTA Proline + Histidine + Vitamin C + EDTA	脯氨酸浓度( $\rho$ ,后同) $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ +组氨酸浓度 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ +维生素 C 浓度 $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ +EDTA 浓度 $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 于 $0\sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 预冷液中浸泡 25 min。 Proline concentration $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + histidine concentration $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + vitamin C concentration $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ + EDTA concentration $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; Soaked in pre-coolant solution at $0\sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ for 25 min.	有效维持双孢菇水分和总酚含量,抑制酪氨酸酶活性,延缓褐变,延长保鲜期 <sup>[45]</sup> 。 It could effectively maintain the water and total phenolic content of <i>Agaricus bisporus</i> , inhibit tyrosinase activity, delay browning and prolong the shelf life.
氯化钙+柠檬酸 Calcium chloride + Citric acid	氯化钙浓度 2.5%+柠檬酸浓度 0.5%; 贮藏温度 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ , 浸泡时间 2 min。 Calcium chloride concentration 2.5% + citric acid concentration 0.5%; The storage temperature was $12 \text{ }^\circ\text{C}$ , and the soaking time was 2 min.	提高双孢菇抗氧化酶活性,减轻氧化损伤,较好保持其色泽和质地 <sup>[46]</sup> 。 Improve the activity of antioxidant enzymes in <i>Agaricus bisporus</i> , reduce oxidative damage, and better maintain its color and texture.
柠檬酸+抗坏血酸+氯化钠 Citric acid + Ascorbic acid + Sodium chloride	柠檬酸 0.1%+抗坏血酸 0.3%+2.5%氯化钠; 真空包装煮 10 min 后冷却,于 $14\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下贮藏 180 d。 Citric acid 0.1% + ascorbic acid 0.3% + 2.5% sodium chloride, vacuum packed and boiled for 10 min, stored at $14\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ for 180 d.	白灵菇菇体乳白、光泽度好,有效抑制褐变,改进色泽 <sup>[47]</sup> 。 The <i>Pleurotus nebrodensis</i> was milky white and had good gloss, which could effectively inhibit browning and improve color.
抗坏血酸+柠檬酸+氯化钙+氯化钠 Ascorbic acid + Citric acid + Calcium chloride + Sodium chloride	抗坏血酸 $0.04 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ +柠檬酸 $0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ +氯化钙 $0.3 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ +氯化钠 $0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ , 电生功能水室温下浸泡 10 min。 Ascorbic acid $0.04 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ + citric acid $0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ + calcium chloride $0.3 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ + sodium chloride $0.2 \text{ g} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$ , soaked in electrobiotic water at room temperature for 10 min.	减轻双孢菇的褐变,改善产品的色泽 <sup>[38]</sup> 。 It could educe the browning of <i>Agaricus bisporus</i> , improve the color of the product.
乙醇熏蒸+1-MCP Ethanol fumigation +1-MCP	用 $400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙醇室温 ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下熏蒸双孢蘑菇 3 h。 Fumigate <i>Agaricus bisporus</i> mushrooms with $400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ethanol at room temperature ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) for 3 h.	抑制双孢菇酶促褐变、羰氨反应,延缓贮藏期间双孢菇白度值的下降 <sup>[41]</sup> 。 It could inhibit the browning of <i>Agaricus bisporus</i> and carbonyl ammonia reaction, delay the decrease of <i>Agaricus bisporus</i> whiteness during storage.

提取分离出来的具有抗氧化、防褐变或抑菌活性的天然物质。目前应用较多的有精油、多糖等,而食用菌中常用的有肉桂醛精油、百里香精油、大蒜提取物等。肉桂精油、薄荷精油等熏蒸对双孢菇、香菇褐变的影响研究较多,并有抑制褐变的效果。有研究发现,4-羟基肉桂酸可通过与底物羟基竞争酶的活性位点来抑制酪氨酸酶的活性,进而抑制双孢菇褐变<sup>[51]</sup>;薄荷等精油熏蒸双孢菇能够抑制 PPO 和 POD 活性,增强 PAL 活性,提高抗氧化物质含量,并可降低菇体中与褐变相关的基因表达,提高抗氧化能力<sup>[52-53]</sup>;而利用肉桂醛熏蒸的香菇,其 CAT 活力和总抗氧化能力显著高于非肉桂醛熏蒸的对照<sup>[54]</sup>。

植物源护色剂一般从中草药或香辛料等植物中提取,来源广泛、无毒无害。但目前其有效成分纯度不高,用量不够精确,且价格偏高。因此,需提高提取物的提取纯化技术,以提高其纯度,探索其精确用量,并研究与其他护色技术的协同作用,实现有效的降本提质从而加速其应用及推广。

2.3.3 微生物源护色剂 微生物源护色剂一方面是通过微生物产生的抗生素和代谢产物来抑制有害微生物,从而防止腐烂变质及菌斑产生,应用较多的是乳酸链球菌素、纳他霉素、聚赖氨酸等。另一方面可能是通过降低 PPO 和 TYR 等的活力及提高其抗氧化能力等手段来延缓褐变,保持良好色泽。徐冬颖等<sup>[55]</sup>的研究将双孢菇分别置于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  纳他霉素溶液及去离子水中浸泡 5 min,沥干后  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  下贮藏 12 d。结果表明,纳他霉素处理可降低霉菌和酵母总数,从而减轻双孢菇的褐变程度。牛耀星等<sup>[56]</sup>利用短小芽孢菌 HN-10 抗菌肽 P-2 对双孢菇进行保鲜研究,发现抗菌肽 P-2 能够有效抑制 PPO 活性的上升,延缓褐变进程,这对抑制双孢菇褐变的研究也具有一定的参考性。

我国生物护色技术的研究起步晚,基础相对薄弱,植物精油等护色剂稳定性差,易挥发及氧化变质,可能会因环境因素如光照、湿度、温度、酸碱度等的影响造成其活性改变甚至丧失。此外,生物保



鲜技术从试验研究到生产应用仍在工艺、成本、功效、稳定性等方面存在诸多问题,有待进一步解决。

虽然上述护色技术一定程度上可维持食用菌品质,但这些技术都有自身局限性。如物理护色通常只能延缓并不能真正抑制褐变,需与其他手段协同使用。化学护色可能存在护色剂超量、失效、毒副作用甚至不符合相关法规要求等问题,此外,使用护色剂进行洗涤、喷洒或涂膜可能会增加食用菌水分活度,为微生物的繁殖提供了条件。利用生物技术进行品种选育也存在品种多、筛选不便等问题。所以在实际生产应用过程中,往往是几种方式协同使用,以期能够强化效果,降低风险,弥补不足。

### 3 问题与展望

我国食用菌产量逐年攀升,发展势头依然良好。食用菌因酶促褐变、非酶促褐变及感染菌斑等问题导致色泽劣变现象突出,但食用菌色泽劣变控制方面仍存在诸多问题,如控制技术缺乏系统性、集成度不高,科学研究与生产实践有所脱节,甚至护色剂不符合相关法规的要求,成果转化较慢或转化率不高,或者是工艺技术较为复杂,成本较高,操作不便,利用基因等分子手段控制食用菌色泽劣变等应用问题依然没有解决。

目前,食用菌的色泽劣变控制技术主要依靠化学或生物护色剂、低温气调等手段,技术单一,难以满足食用菌产业快速发展的需求,因此食用菌色泽劣变控制技术的研究对产业的发展意义重大。

食用菌色泽劣变机制及系统方面的研究建议持续加强:

一是机制或规律地深入研究。建议对不同食用菌劣变机制或规律进行深入研究,开发抑制色泽劣变的新技术新工艺,减少因食用菌生理生化反应导致的色泽劣变。此外,目前食用菌色泽劣变研究多集中在抑制 PPO 等酶活性方面,而鲜有研究能够深入到关键基因的调控筛选,建议从基因水平对与褐变相关的基因组序列开展研究,以期从根本上解决其褐变问题。

二是系统性、动态性、全程性研究。系统性研究不同食用菌在贮藏或加工阶段色泽变化与贮藏或加工条件的相互关系,建立整个生产流程所适宜的色泽劣变控制技术手段,并研究不同流程不同手段的协同性,为食用菌的贮藏和加工提供理论参考。

此外,对食用菌色泽劣变控制技术开展动态性、全程性集成研究,从生长期到采摘、采后贮藏、

运输、加工、货架期过程中影响食用菌色泽的因素进行动态系统的分析,各流程环环相扣,无缝对接,降低过程劣变风险。

食用菌色泽劣变控制技术方面的研究建议不断强化:

一是在基因水平深入探究。探究与色泽劣变有关的基因组序列,研究相关基因的修饰、转录及表达在色泽劣变方面的影响,利用基因技术获得良种,以期从分子水平上解决色泽劣变等问题。

二是现有技术的优化及新技术研究。对现有技术如低温、辐射及超高压技术等相关的设备设施进行改进,节能降耗,降本提质,提高操作便利性及安全性;提高生物护色剂的提取效率,促进成熟技术的转化应用;强化辐射技术和生物手段等高成本技术与其他护色技术的协同应用,倡导复合护色剂或复合护色技术的互补增效,在一定程度上降低投资及运营成本并减少保鲜剂使用量,使其向绿色、健康方向转型发展。与此同时,开展护色相关的新技术研究,如开发绿色、环保、安全的护色剂,用天然绿色的生物护色剂代替传统的化学试剂;研究新型、安全、高效、兼具抗菌、保鲜、降解、可食用等多功能包装材料;创制高效的护色、杀菌设备及工艺,走高效、低耗、降本、便捷的道路,着眼于系统性、动态性、全程性研究,建立集成各环节综合的、配套的、适宜的技术手段。

三是检测设备的研发。研发感官仿生技术和在线检测技术相关设备设施,尤其是便携式仪器,实现色泽劣变产品的在线、高效检测。

此外,在物联网及信息化的背景下,未来食用菌色泽劣变控制技术应具备抵抗环境变化的抗逆能力及适应人们对追根溯源的品质要求,使食用菌产业向着智能化、数字化、信息化的方向发展,走系统化、集成化、产业化的发展道路,实现更多的社会化功能。

### 参考文献

- [1] 中国食用菌协会.2022年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌,2024,43(1):118-126.
- [2] LIN X H, SUN D W. Research advances in browning of button mushroom (*Agaricus bisporus*): Affecting factors and controlling methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90:63-75.
- [3] 许小璐,刘静,邓冰,等.短波紫外线处理对采后香菇褐变的影响[J].核农学报,2021,35(5):1129-1135.
- [4] 陶璐,申可,刘天植,等.山楂果胶寡糖对香菇保鲜效果的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(7):226-230.

- [5] 黄欣莉,韩延超,陈杭君,等. 1-MCP通过调控香菇能量代谢抑制其采后褐变[J]. 食品科学,2022,43(13):192-198.
- [6] MOHAPATRA D, FRIAS J M, OLIVEIRA F A R, et al. Development and validation of a model to predict enzymatic activity during storage of cultivated mushrooms (*Agaricus bisporus* spp.)[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(1):39-48.
- [7] 王璋. 食品化学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [8] 商立超,弓志青,王文亮,等. 食用菌采后保鲜技术研究进展[J]. 山东农业科学,2022,54(7):149-156.
- [9] 张玉笑,马阳历,郭衍银,等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>自发气调对香菇保鲜效果的影响[J]. 中国果菜,2020,40(11):12-20.
- [10] 谢丽源,郑林用,甘炳成,等. 贮藏温度对采后杏鲍菇生理特性的影响[J]. 西南农业学报,2016,29(1):153-158.
- [11] 王丽芳,王晓拓,王志东. 贮藏温度对双孢蘑菇褐变和抗氧化活性的影响及动力学研究[J]. 现代食品科技,2015,31(2):157-163.
- [12] 王则金,陈斯凯,邱万伟,等. 低温贮藏抑制鲜猴头菇褐变机制研究[C]//福建省制冷学会. 福建省科协第十五届学术年会福建省制冷学会分会场—福建省制冷学会2015年学术年会(创新驱动发展)论文集,2015.
- [13] 王玉迪. 失水处理对采后香菇品质及风味的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [14] 张国强,乔勇进,王晓,等. 相对湿度对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技,2019,40(13):226-230.
- [15] 余华,刘达玉,李宗堂,等. 食用菌采后生理特性及保鲜技术研究进展[J]. 中国食用菌,2015,34(1):70-73.
- [16] QUEVEDO R, DIAZ O, VALENCIA E, et al. Differences between the order model and the weibull model in the modeling of the enzymatic browning[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016,9(11):1961-1967.
- [17] 沙如意,崔艳丽,王少林,等. 植酸/植酸钠在食品工业上的应用研究进展[J]. 现代食品科技,2018,34(6):293-309.
- [18] 黄欣莉,韩延超,陈杭君,等. 1-甲基环丙烯通过调控香菇能量代谢抑制其采后褐变[J]. 食品科学,2022,43(13):192-198.
- [19] 陈代良,陈杭君,刘瑞玲,等. 振动胁迫对双孢菇褐变与抗氧化能力的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(17):258-265.
- [20] POURBAGHER R, ABBASPOUR-FARD M H, SOHBATZADEH F, et al. *In vivo* antibacterial effect of non-thermal atmospheric plasma on *Pseudomonas tolaasii*, a causative agent of *Agaricus bisporus* blotch disease[J]. Food Control, 2021, 130:108319.
- [21] SOLER-RIVAS C, ARPIN N, OLIVIER J M, et al. WLIP, a lipopeptide of *Pseudomonas reactans*, as inhibitor of the symptoms of the brown blotch disease of *Agaricus bisporus*[J]. Journal of Applied Microbiology, 1999,86(4):635-641.
- [22] KERTESZ M A, THAI M. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018,102(4):1639-1650.
- [23] WANG G Z, GONG Y H, HUANG Z Y, et al. Identification of and antimicrobial activity of plant extracts against *Pseudomonas putida* from rot fruiting bodies of *Pleurotus eryngii*[J]. Scientia Horticulturae, 2016,212:235-239.
- [24] 赵慧. 平菇黄斑病原菌的分离鉴定、侵染机制与生物防治研究[D]. 山西晋中:山西农业大学,2019:35-38.
- [25] SINGH P, LANGOWSK H C, WANI A A, et al. Recent advances in extending the shelf life of fresh *Agaricus* mushrooms: A review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(9):1393-1402.
- [26] 邱铭镭,胡宇欣,林程,等. 食用菌采后保鲜方法在草菇上的应用进展[J]. 中国食用菌,2022,41(2):1-5.
- [27] 刘莎莎. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>主动自发气调对平菇保鲜效果的影响[D]. 山东淄博:山东理工大学,2019.
- [28] LESPINARD A R, GONI S M, SALGADO P R, et al. Experimental determination and modeling of size variation, heat transfer and quality indexes during mushroom blanching[J]. Journal of Food Engineering, 2009,92:11-17.
- [29] 李君兰,李贻华,赵秋玲,等. 鸡腿蘑速冻预处理工艺及护色研究[J]. 食品与发酵工业,2006,32(4):145-149.
- [30] LEI J, LI B J, ZHANG N, et al. Effects of UV-C treatment on browning and the expression of polyphenol oxidase (PPO) genes in different tissues of *Agaricus bisporus* during cold storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139:99-105.
- [31] 李娜. 超声波处理结合温/湿度控制对草菇采后保鲜作用及其机制的研究[D]. 江苏镇江:江苏大学,2018.
- [32] LEE N Y, KIM N H, JANG I S, et al. Decontamination efficacy of neutral electrolyzed water to eliminate indigenous flora on a large-scale of cabbage and carrot both in the laboratory and on a real processing line[J]. Food Research International, 2014, 64:234-240.
- [33] ADAY M S. Application of electrolyzed water for improving postharvest quality of mushroom[J]. LWT- Food Science and Technology, 2016,68:44-51.
- [34] WU S J, NIE Y, ZHAO J H, et al. The synergistic effects of low-concentration acidic electrolyzed water and ultrasound on the storage quality of fresh-sliced button mushrooms[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(2):314-323.
- [35] ZHANG K X, PU Y Y, SUN D W. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78:72-82.
- [36] 刘主,何正兵,蔡爱群,等. 草菇干制非硫护色技术研究[J]. 韶关学院学报,2018,39(3):64-69.
- [37] 靳婕,路雪美,冯小雨. 果蔬化学护色技术研究进展[J]. 吉林医药学院学报,2022,43(1):61-63.
- [38] 刘丽娜,王安建,李玉爽. 双孢菇的非硫护色及热风干燥方式的研究[J]. 食品工业科技,2014,35(12):303-306.
- [39] 王朝宇,迟雪文,毕艳红,等. 响应面法优化双孢菇加工中的护色工艺[J]. 食品工业科技,2017,38(16):167-171.
- [40] 靳苗苗,李云云,张洪翠,等. 乙醇熏蒸对双孢蘑菇的护色作用[J]. 食品与发酵工业,2018,44(9):196-203.
- [41] 李云云. 乙醇熏蒸处理对双孢蘑菇保鲜品质的影响[D]. 重庆:西南大学,2017.
- [42] LIN J P, CAI X X, TANG M R, et al. Preparation and evalua-



- tion of the chelating nanocomposite fabricated with marine algae *Schizochytrium* sp. protein hydrolysate and calcium[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63 (44): 9704-9714.
- [43] ALI S, KHAN A S, MALIK A U. Postharvest L-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 135-142.
- [44] 刘吟. 双孢蘑菇采后褐变的相关生理生化变化及其保鲜技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [45] 王赵改, 杨慧, 朱广成, 等. 复方保鲜剂对双孢蘑菇保鲜效果的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(1): 93-109.
- [46] KHAN Z U, BU J W, KHAN N M, et al. Integrated treatment of CaCl<sub>2</sub>, citric acid and sorbitol reduces loss of quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39 (6): 2008-2016.
- [47] 赵元寿, 高国强, 杨虎, 等. 白灵菇(*Pleurotus nebrodensis*)软罐头护色研究[J]. 中国食品添加剂, 2009(2): 130-132.
- [48] 李艳杰, 郭玉曦, 丁树东, 等. 1-MCP 和壳聚糖处理对香菇采后抗氧化能力的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 38-44.
- [49] LIU J, MENG C G, WANG X C, et al. Effect of protocatechuic acid - grafted - chitosan coating on the postharvest quality of *Pleurotus eryngii*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(38): 7225-7233.
- [50] 杨鑫, 范家恒, 段甯耀, 等. 蜂胶乙醇提取液对杏鲍菇及污染菌的抑制作用[J]. 食品与发酵工业, 2013(7): 128-131.
- [51] HU Y H, CHEN C M, XU L, et al. Postharvest application of 4-methoxy cinnamic acid for extending the shelf life of mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 104: 33-41.
- [52] QU T T, LI B B, HUANG X F, et al. Effect of peppermint oil on the storage quality of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(8): 404-418.
- [53] 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.
- [54] 钱霄晨, 蔺凯丽, 黄琦, 等. 肉桂醛熏蒸处理对香菇采后抗氧化能力及多胺的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 263-269.
- [55] 徐冬颖, 顾思彤, 周福慧, 等. 纳他霉素处理对鲜切双孢菇褐变的抑制机理[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 255-262.
- [56] 牛耀星, 贲建民, 李彦虎, 等. 短小芽孢菌 HN-10 抗菌肽 P-2 对双孢蘑菇保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 133-139.