

饶克诚, 黄文, 王益, 等. 食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 454–462. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107

RAO Kecheng, HUANG Wen, WANG Yi, et al. Research Advances on Quality Evaluation Factors and Preservation Technology of Edible Mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 454–462. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107

· 专题综述 ·

食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展

饶克诚¹, 黄文^{1,2}, 王益¹, 史德芳³, 高虹³, 刘莹^{1,2,*}

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070;

2. 果蔬加工与品质调控湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070;

3. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 食用菌富含多种营养物质且味道鲜美, 深受消费者喜爱。但食用菌采后极易出现开伞、褐变和腐烂等品质劣变现象, 严重限制食用菌产业发展。因此, 本文概述了食用菌品质评价因素, 包括感官品质、内在品质 and 安全性, 以双孢菇为例总结了食用菌保鲜技术, 包括物理保鲜 (低温保鲜、气调保鲜、辐射保鲜、失水处理保鲜、磁场保鲜和电场保鲜)、化学保鲜 (化学保鲜剂保鲜、臭氧保鲜、电解水和等离子体活化水保鲜)、生物保鲜 (生物涂膜保鲜、植物提取物保鲜和微生物防腐剂保鲜和拮抗菌保鲜) 及其应用情况, 提出当前品质评价和保鲜技术存在的不足, 并对食用菌品质评价和保鲜技术未来的发展方向做出展望, 以期促进食用菌产业进步和发展。

关键词: 食用菌, 品质评价, 保鲜技术, 物理保鲜, 化学保鲜, 生物保鲜

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)17-0454-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107



本文网刊:

Research Advances on Quality Evaluation Factors and Preservation Technology of Edible Mushrooms

RAO Kecheng¹, HUANG Wen^{1,2}, WANG Yi¹, SHI Defang³, GAO Hong³, LIU Ying^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing and Quality Control, Wuhan 430070, China;

3. Institute of Agro-Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: Edible mushrooms are well received by consumers due to their various nutrients and tasty. However, mushrooms are prone to cap opening, browning, rotten and other deterioration phenomena after harvest, which severely limits the development of mushrooms industry. Therefore, this paper summarizes the quality evaluation factors of mushrooms, including sensory quality, intrinsic quality and safety. As an example, the preservation technologies of *Agaricus bisporus* are summarized, including physical preservation (low temperature preservation, modified atmosphere preservation, radiation preservation, dehydration treatment preservation, magnetic field preservation and electrostatic field preservation), chemical preservation (chemical preservatives preservation, ozone preservation, electrolyzed water and plasma-activated water preservation) and biological preservation (biological coating preservation, plant extracts preservation, microbial preservatives preservation and antagonistic bacteria preservation). The application of preservation technologies in mushrooms is also summarized. The shortcomings in the current quality evaluation and preservation technologies of mushrooms are put forward. The development of the quality evaluation and preservation of mushrooms is prospected in order to promote the progress and development of mushrooms industry in the future.

Key words: edible mushrooms; quality evaluation; preservation technology; physical preservation; chemical preservation; biological preservation

收稿日期: 2022-11-11

基金项目: 湖北省食用菌产业技术体系 (HBHZDZB-2021-023)。

作者简介: 饶克诚 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食用菌加工及综合利用, E-mail: 2337276305@qq.com。

* 通信作者: 刘莹 (1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品品质调控与健康产品开发, E-mail: yingliu@mail.hzau.edu.cn。

食用菌是可食用的大型真菌,俗称蘑菇,又称菇、蕈、芝、耳等。全世界目前发现食用菌 2000 余种,能大面积人工种植的只有 40~50 种。我国是食用菌生产大国,主要栽培品种有香菇、平菇、金针菇、杏鲍菇和双孢菇等^[1],2020 年总产量达到 4016.43 万吨,食用菌产业是我国农业种植业的重要组成部分^[2]。食用菌味道鲜美,富含蛋白质、维生素、矿物质、多糖、三萜和黄酮等营养物质,是深受消费者喜爱的健康食品^[3]。

随着经济发展,消费者对食用菌的色泽大小等感官品质和营养等内在品质有着更高要求,对安全性追求也越来越高。但当前市场上食用菌品质参差不齐,经常出现以次充好的现象,消费者对食用菌品质了解也较为匮乏。亟待对食用菌进行品质分级,实行以质论价和优质优价,这不仅有利于满足消费者需求,还能规范市场交易环境,提升食用菌产业竞争力。目前对食用菌品质提出指标虽多但不系统,无法全面准确描述和评价其品质。且食用菌采后流通过程中易发生品质劣变影响口碑,这一现象不容忽视。目前我国食用菌产业结构较为单一,主要以鲜食为主,食用菌加工率仅为 6%,且食用菌产地多为农村地区,运输跨度大,对食用菌品质产生极大影响^[1]。新鲜食用菌含水量高,新陈代谢旺盛,缺乏保护组织,易受到机械损伤和微生物侵染,导致失水、褐变和腐烂等品质劣变^[4],使其商品价值下降,食用菌的不耐贮藏性极大限制其异地销售,制约我国食用菌行业健康发展。食用菌采后主要通过物理、化学和生物保鲜技术来维持其品质。目前食用菌商业化保鲜以物理保鲜为主,主要是低温和自发气调保鲜技术等,通过降低菇体生理代谢水平,抑制酶活性等来维持其品质,相较于其它保鲜技术,低温和自发气调等物理保鲜技术具有操作简单和安全性高等优势;化学保鲜技术包括化学保鲜剂和臭氧等,生物保鲜技术包括生物涂膜和植物提取物等,化学和生物保鲜技术能抑制微生物侵染,延缓菇体腐烂,但化学保鲜技术易残留带来安全隐患,生物保鲜技术成本较高,目前均较少应用于食用菌商业化保鲜^[5]。随着科技水平发展,各种新型食用菌保鲜技术不断出现,并且更加节能、高效和安全,但很多仍处于实验研究阶段,而传统保鲜技术存在高能耗和高成本等局限。因此,深入研究食用菌品质评价因素和保鲜技术迫在眉睫。

本文介绍了食用菌品质评价因素研究进展,以在世界上种植范围最广的双孢菇为例对近年来应用于食用菌的保鲜技术进行综述,并为食用菌品质评价因素和保鲜技术的开发做出展望,以期为食用菌实现准确高效的品质分级,并在此基础上研究保鲜技术提供新思路,从而促进食用菌产业发展。

1 食用菌品质评价因素研究进展

1.1 食用菌感官品质评价因素

感官品质评价直接反映了消费者的喜爱程度,

规范了食用菌的品质。食用菌感官品质评价指标包括色泽、质构、大小、形态、风味和滋味 6 项。

食用菌采后极易发生褐变、软化、开伞和风味劣变等感官品质劣变现象,影响食用菌的商品价值。食用菌表面色泽均匀、维持其固有色泽及无斑点最佳;质构要求菇体硬度高、弹性好、无木质化;较好的食用菌形态和大小要求朵形大小适中、开伞适宜、菌盖圆整和菌柄粗壮,无畸形和空心;食用菌风味以具有清新菇香味无异味为佳,滋味以味道鲜甜为佳^[6-7]。

目前采用的感官品质评价会受到感官评定员的感觉灵敏度和培训水平等因素的干扰,受主观意识影响较大,提出的感官指标虽多却不系统,导致评价结果缺乏完整性和精确性^[8]。近年来质构仪、色差仪、电子鼻和电子舌等感官仿生仪器的广泛应用较好解决了这些问题,具有结果客观准确、可量化、灵敏度高和重现性好的优势,在未来食用菌感官评价中具有较大的应用潜力。不过,感官仿生技术的应用还具有一定的局限性,相关研究也还处于初步阶段,未来尤其应关注感官仿生技术预测模型的通用性验证。仪器的成本也是限制其发展的重要原因,需加强便携式感官仿生仪器的研发,为消费者评估食用菌感官特性状况提供更高的便捷性。模糊数学法、主成分分析、因子判别分析和聚类分析等作为感官特性评价的有效方法可相互结合应用于食用菌,使评价结果更加科学可靠,且可筛选出影响食用菌品质的关键特征指标,便于进行品质分类^[9-10]。

1.2 内在品质评价因素

一般认为蛋白含量高、多糖含量高、酚类和黄酮类活性物质含量高、嘌呤含量低、营养均衡的食用菌品种适合食用^[11]。

食用菌蛋白是绝佳的膳食蛋白来源。罗晓莉等^[12]测定了 8 种云南食用菌蛋白含量,发现除白参菌、金耳和黑木耳外,其它食用菌均属于蛋白质食品,且香菇、姬松茸和白参菌的必需氨基酸比例更接近理想蛋白质模式。水分含量是影响食用菌风味和口感的关键因素,食用菌采后失水过多会导致新鲜度下降。食用菌多糖、黄酮类和多酚类等活性物质能有效调节身体机能,含量高的食用菌品种适合食用。食用菌的营养价值特点与其类群存在一定联系。徐傲^[11]发现伞菌目、肉座菌目食用菌蛋白质、维生素、矿物质、多糖、氨基酸含量高,但嘌呤含量也整体偏高,而木耳目、牛肝菌目、猴菇目和银耳目营养成分和嘌呤含量偏低。食用菌未开伞时采收最好,此时营养物质含量较高^[7]。食用菌采后生长发育所需能量源于菇体自身物质,贮藏过程中菇体蛋白质、多糖、纤维素和不饱和脂肪酸等含量下降,内在品质下降。目前只对食用菌内在品质指标中水分和灰分等的范围作了简单描述,《绿色食品 食用菌》(NY/T 749-2018)^[13]中规定,食用菌鲜品水分含量 $\leq 90\%$,灰分含量 $\leq 8.0\%$,但蛋白质和多糖等指标的等级标准尚

未提出,未来需要对食用菌营养成分利用主成分分析和聚类分析等方法进行全面综合分析以便于质量分级。目前食用菌品质劣变进程中营养物质和积累的中间代谢产物研究还不够深入,基于蛋白质、多糖等营养物质代谢过程的研究将是未来食用菌品质特性机制研究的重要方向,代谢组学、蛋白组学等研究方法潜力巨大。

1.3 安全性评价因素

食用菌安全性主要受农药、重金属、添加剂和微生物污染影响。在我国获得登记可用于食用菌的农药有效成分只有7种,菇农乱用农药常有发生,且木屑、棉籽壳等食用菌栽培基质中也可能含有农药,导致食用菌易发生农药残留^[14]。食用菌对于镉、铅、汞等金属元素有较强的富集吸收性能^[15],由于产地环境恶化和栽培基质滥用,重金属含量超标成为食用菌质量安全中较突出的问题。目前荧光增白剂、二氧化硫、工业柠檬酸和甲醛等添加剂在食用菌中滥用现象较多^[14]。食用菌栽培过程中,堆肥、高温、高湿的环境有利于微生物生长,导致食用菌易受微生物侵染,使食用菌加速腐败,且食用菌易感染的真菌曲霉属和粉红单端孢霉等会分泌毒素,危害人体健康^[16]。针对食用菌农药残留问题,采用生物酶降解、光解、控制温度和湿度以及调整土壤粒径等安全有效的技术手段降解农药已处于实验室研究阶段,应加快研发使其应用于农药降解^[17]。针对重金属超标问题,研究表明可采用有效的农艺措施如施用符合标准的肥料或添加有益的金属元素来拮抗重金属元素^[18],未来需进一步加强食用菌对重金属的耐受机制和分子水平研究,并加强筛选和培育低重金属富集特性的食用菌新品种。针对添加剂和微生物污染问题,应加强添加剂用量确定研究和开发高效的处理工艺来降低添加剂用量,加强研究食用菌栽培环境及栽培工艺对其微生物污染风险的影响,建立完善的食用菌添加剂使用规范和有效预防微生物污染的食用菌栽培规范。

2 食用菌保鲜技术

2.1 物理保鲜技术

2.1.1 低温保鲜 低温保鲜是最常用的保鲜技术,能有效抑制食用菌生理代谢和微生物生长,降低呼吸强度和菇体内酶活性,减少营养损失和水分散失,抑制褐变和软化,延长贮藏保鲜期^[6]。不同食用菌最适贮藏温度不同,一般食用菌最适贮藏温度为0~5℃。

研究表明低温贮藏双孢菇可显著降低呼吸强度,提升保鲜效果^[19]。低温保鲜操作简便,保鲜效果较好,已广泛应用于食用菌保鲜。但需防止温度频繁波动导致冷害等不良影响,且低温不能抑制所有微生物,为进一步提高食用菌保鲜效果需与其它保鲜技术结合使用。

在低温保鲜基础上,人们开发出真空预冷和冰温保鲜技术。真空预冷技术将食用菌置于真空环境中,使菇体中水分快速蒸发吸收热量,与传统预冷方式相比可更快实现降温,且菇体内外冷却均匀,且低压环境还能抑制微生物繁殖,应用前景广阔^[20]。

冰温保鲜技术是将贮藏温度控制在组织冰点以上和0℃以下范围内,在不破坏果蔬组织的同时能较好保持果蔬的营养成分和新鲜度^[21-22]。目前食用菌的冰温保鲜技术研究较少,且部分食用菌不耐低温,针对不同种类食用菌能否使用冰温保鲜以及对冰温温度的确定还需进一步研究。但冰温贮藏后期果蔬易发生冷害和冻害,且冰温保鲜需要专用设备对温度精准控制,较难推广应用。

2.1.2 辐射保鲜 辐射保鲜技术是使用射线或光照影响照射食用菌,杀死菇体表面有害微生物,抑制食用菌生理代谢,延长保鲜期^[23]。现将辐射保鲜技术在双孢菇上的应用总结如表1所示。 γ 射线和电子束通过破坏微生物的DNA防止细胞分裂,且水分经辐射生成多种游离基和过氧化氢与微生物细胞内物质作用,导致微生物细胞死亡;短波紫外线破坏微生物细胞的DNA或RNA分子结构,阻碍蛋白质和酶合成,起到杀菌效果;超声使细胞内容物强烈振荡,破坏微生物细胞膜和细胞壁,对微生物起到杀灭作用;LED光保鲜是新型技术,其灭菌机制尚未明晰,在食用菌上研究较少,可作为未来食用菌保鲜研究的一个方向^[24-28]。辐射保鲜技术在使用时需合理控制处理剂量和时间,避免辐射处理过度造成食用菌损伤使其品质下降。研究表明电子束处理剂量为2.0 kGy时可延长双孢菇贮藏期,但剂量为4.0 kGy时会加速营养成分降解产生负面影响^[25]。辐射保鲜技术杀菌效果较好,具有无残留、用时短、安全性高和效果显著的优点,但对设备和操作人员要求较高,运行成本较高,阻碍了其推广应用。未来需加强辐射保鲜技术与其他保鲜技术的联合应用研究,减少使用剂量避免对食用菌营养成分的破坏,同时节约成本,来加速其推广应用。

表1 辐射保鲜技术在双孢菇保鲜中的应用

Table 1 Application of radiation preservation technology in preservation of *Agaricus bisporus*

辐射保鲜技术	工艺参数	保鲜效果	参考文献
γ 射线	贮藏温度: 4℃ ^{60}Co 射线辐照剂量: 1.2 kGy	有效减少开伞和腐烂, 延长货架期	[24]
电子束	贮藏温度: 4℃ 电子束辐照剂量: 2.0 kGy	有效维持营养成分含量, 延长货架期	[25]
短波紫外线	贮藏温度: (4±0.5)℃ 短波紫外线辐照剂量: 1.0 kJ/m ²	降低褐变度、多酚氧化酶(PPO)活性及与褐变相关的基因转录水平	[26]
超声	贮藏温度: 4℃ 微波输出功率: 400 W 处理时间: 10 min	降低失重率和PPO活性, 有效抑制褐变	[27]
LED光	贮藏温度: 4℃ LED光处理剂量: 22 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	减少微生物侵染, 降低失重率, 减轻氧化损伤, 维持较好感官品质	[28]

注: LED光研究对象为平菇, 使用光源为LED白光。

2.1.3 气调保鲜 气调保鲜通过调节贮藏环境中氧气和二氧化碳等气体成分比例,降低果蔬呼吸强度,抑制微生物生长,提高贮藏效果^[29]。气调贮藏可分为两类,即人工气调和自发气调。

人工气调通常是降低环境中氧气浓度并提高二氧化碳浓度,抑制食用菌生理代谢,提高保鲜效果。刘云云^[30]研究发现采用 9.6% O₂+6.9% CO₂+83.5% N₂ 的气调包装可较好保持双孢菇的色泽和硬度。但食用菌呼吸强度较高,采用传统气调易形成厌氧环境,导致无氧呼吸增强,过多消耗营养物质,产生乙醇和乙醛等异味物质,因此近年来高氧气调和短时厌氧处理兴起。研究表明 80% O₂+20% N₂ 气调包装双孢菇可使其保持较好货架品质^[31]。任浩^[32]采用氮气对双孢菇进行 6 h 厌氧处理可显著降低呼吸速率,起到较好保鲜效果。人工气调需对气体成分严格控制,贮藏效果较好,但对设备要求较高且成本高昂,较难推广应用。

自发气调操作简便且成本低,目前已应用于食用菌商业化保鲜,自发气调是利用果蔬自身呼吸作用来降低包装中氧气浓度和提高二氧化碳浓度,抑制果蔬呼吸和微生物生长。自发气调包装技术能否推广应用的关键在于包装材料的透气性和透湿性等性能。目前食用菌气调保鲜包装材料以聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)和聚丙烯(PP)等较为常见,但这些材料透气性和透湿性较低,易引发 CO₂ 过度积累和水汽在膜表面结露。当包装材料的透气性和透湿性不能达到最优时,可采用激光打孔等形成微孔来提高保鲜效果^[33]。食用菌贮藏品质还受到包装材料厚度影响,包装膜厚度过大不利于气体渗透,而厚度过小则机械性能差^[34]。因此,开发同时具备较高的气体渗透分离性能和机械性能的无缺陷复合膜极为迫切。包装引起乙烯积累会影响食用菌成熟,但目前对膜材料的气体渗透性研究多集中于氧气、二氧化碳和水蒸气,对乙烯渗透性的研究较少,未来需加强相关研究。在传统包装材料基础上,通过添加一些活性成分或纳米材料,能够起到更好的抗菌和保鲜效果。Wrona 等^[35]发现将绿茶提取物和焦亚硫酸钠+柠檬酸添加到包装中能有效保持鲜切双孢菇的感官品质。Cai 等^[36]研究发现,向聚乙烯醇(PVA)中分别添加 1% 纳米 SiO₂ 和 TiO₂ 制成复合纳米包装材料,能有效降低双孢菇水分散失和微生物数量。自发气调操作简便,成本低,便于贮运流通,但大部分包装材料不可降解,易造成环境污染。目前可降解的聚乳酸(PLA)和聚己二酸对苯二甲酸丁二酯(PBAT)等材料已处于研究阶段,但这些材料成本较高,且气体渗透等性能也亟待提升^[37]。未来需加强开发易降解、选择透过性高和成本低的包装材料。

2.1.4 其他保鲜技术 失水处理保鲜是指在温和条件下通过电扇、鼓风机等设备处理果蔬,适当减少其水分含量,可降低果蔬脆性减少机械损伤发生,降低

生理代谢活动,抑制微生物生长,起到保鲜作用^[38]。研究表明使用电扇对香菇进行 9% 失水处理可保持较高的抗氧化酶活性,保鲜效果较好^[39]。失水处理操作简单,绿色环保,但失水处理会导致经济损失,且目前失水处理在食用菌中仅限于对香菇保鲜的研究,失水率低且保鲜效果好的失水处理工艺可作为未来食用菌保鲜的一个研究方向。

磁场保鲜是通过低强度磁场稳定果蔬细胞膜结构,降低膜通透性和水分散失,对果蔬组织电解质、分子组成结构以及细胞膜膜脂、蛋白质等的电磁性质造成影响,抑制氧化酶活性,抑制腐败菌生长繁殖,达到保鲜目的^[40]。杨末尧^[41]发现 2 mT 的静磁场和交变磁场处理双孢菇能有效降低微生物总量,且交变磁场处理的双孢菇保鲜效果更好。磁场保鲜处理不会产生有害物质,操作简单,成本较低。目前磁场保鲜技术在食用菌保鲜领域研究较少,未来需要进一步对不同参数的磁场进行系统性研究,并探索其保鲜机制,从而为开发出可应用于商业化的磁场保鲜技术提供实验基础。

电场保鲜是将果蔬置于电场内来改变果蔬的电荷分布与水分活度,影响生物体酶的活性,从而达到保鲜目的,具有能耗低和环保绿色的优点^[42]。Yan 等^[43]发现,高压静电场(3000 V,50 Hz)处理双孢菇能够提高超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性,更好保持双孢菇的微观结构,延长其货架期。但高压静电场电压强度大,对设备和贮藏环境要求较高,且存在安全性问题,限制了产业化应用,而新兴的低压静电场技术能较好解决这些问题^[44]。但目前食用菌电场保鲜技术研究较少,未来需加强低压静电场对食用菌保鲜效果的系统研究以期实现商业化应用。

2.2 化学保鲜技术

2.2.1 化学保鲜剂保鲜 化学保鲜剂保鲜是利用化学试剂浸泡、喷淋或熏蒸等处理食用菌,杀灭菇体表面微生物,抑制菇体内酶活性和呼吸作用,延缓菇体衰老,延长保鲜期^[45]。目前常用的化学保鲜剂有 1-甲基环丙烯(1-MCP)、二氧化氯及复合保鲜剂等,其在双孢菇上的应用如表 2。1-MCP 是一种常见且高效的乙烯抑制剂,能有效竞争乙烯受体结合位点,不可逆地阻断与成熟和衰老相关基因转录的信号转导,延缓引起果蔬成熟的生化反应,1-MCP 具有无毒、无残留、低量和高效的优点^[46]。二氧化氯是公认的安全和高效杀菌剂,其杀菌机理可能为渗透和氧化细胞表面定位的蛋白质,提高细胞膜通透性,氧化破坏 DNA、RNA 和蛋白等,影响微生物代谢^[47]。复合化学保鲜剂通过几种成分的协同增效作用,可减少单一成分添加,避免使用过量,同时提升保鲜效果。除了上述几种化学保鲜剂,有研究报道乙醇熏蒸处理也可用于保鲜,乙醇能够高效杀灭微生物,抑制酚类物质生成和褐变相关酶活性来延缓褐变,抑制呼吸作用和

表 2 化学保鲜剂在双孢菇保鲜中的应用

Table 2 Application of chemical preservatives in preservation of *Agaricus bisporus*

化学保鲜剂	工艺参数	保鲜效果	参考文献
1-甲基环丙烯	贮藏温度: 5 ℃ 1-甲基环丙烯浓度: 5 μL/L 熏蒸时间: 12 h	降低呼吸强度和失重率, 较好保持感官品质	[45]
二氧化氯	贮藏温度: 4 ℃ 二氧化氯浓度: 150 mg/L 浸泡时间: 10 min	杀灭微生物, 抑制PPO活性, 推迟PPO和过氧化物酶(POD)活性高峰出现, 延缓褐变和萎焉	[47]
氯化钙+柠檬酸	贮藏温度: 12 ℃ 氯化钙浓度: 2.5% 柠檬酸浓度: 0.5% 浸泡时间: 2 min	提高抗氧化酶活性, 减轻氧化损伤, 较好保持了色泽和质地	[49]
脯氨酸+组氨酸+V _C +EDTA	贮藏温度: 0~3 ℃ 脯氨酸浓度: 1.5 g/L 组氨酸浓度: 1.5 g/L V _C 浓度: 6.0 g/L EDTA浓度: 6.0 g/L 浸泡时间: 25 min	有效维持水分和总多酚含量, 抑制酪氨酸酶活性, 延缓褐变, 延长保鲜期	[50]
L-半胱氨酸	贮藏温度: 3~4 ℃ L-半胱氨酸浓度: 0.4 mg/L 浸泡时间: 30 min	有效抑制褐变和失重率, 减少营养损失	[51]
乙醇	贮藏温度: (3±1) ℃ 乙醇浓度: 400 μL/L 熏蒸时间: 3 h	降低呼吸强度和菌落总数, 较好保持感官品质	[48]

乙烯生成^[48]。乙醇处理操作简便, 成本低, 安全性高, 有望实现推广应用。化学保鲜剂处理能有效延缓食用菌品质劣变, 保鲜成本低, 操作简单, 便于联合使用, 但一些保鲜剂如亚硫酸盐等易残留引起安全问题, 因此开发绿色高效的化学保鲜剂是未来的研究方向。

2.2.2 臭氧保鲜 臭氧保鲜是利用臭氧的强氧化性破坏微生物的细胞膜和细胞壁, 并渗透进细胞内使蛋白质变性, 破坏酶系统, 影响其正常生理代谢从而杀死微生物, 臭氧还能消除乙烯、乙醛等呼吸作用产生的有害物质, 缩小食用菌表面气孔, 降低呼吸强度, 延长食用菌保鲜期^[52]。臭氧处理可通过臭氧溶液浸泡或气体熏蒸实现。采用臭氧处理食用菌, 具有无残留、无污染、成本低、操作简单的优点。Wang 等^[52]发现, 双孢菇经 2.77 mg/L 臭氧熏蒸 15 min, 能减少失水和氧化损伤, 抑制菌落总数上升, 延长 8~10 d 的货架期。但臭氧浓度过高会使食用菌代谢紊乱, 降低贮藏品质^[39]。目前臭氧处理食用菌研究还处于实验室研究阶段, 臭氧的最佳处理浓度和保鲜机理尚未形成定论, 将其应用于商业化保鲜还需进一步深入研究。

2.2.3 酸性电解水和等离子体活化水保鲜 电解水是将稀盐溶液或稀盐酸溶液电解而得到的酸性和碱性电解水的总称, 酸性电解水具有低 pH 和高氧化还原电位, 含有氯气和次氯酸等杀菌物质, 对大肠杆菌 O157:H7 和单核增生李斯特菌等微生物都有抑制作用, 研究表明低浓度酸性电解水就具有较强的杀菌作用, 可作为有效的消毒剂用于果蔬保鲜^[53-54]。Wu 等^[53]使用低浓度酸性电解水(有效氯的质量浓度为 16.86 mg/L)浸泡鲜切双孢菇, 能有效降低菌落总数, 延缓褐变和软化。等离子体活化水是指水被低温等离子体处理后, 富含活性氧(ROS)和氮物质(RNS)的水溶液, 导致氧化还原电位和电导率变化, 可作为新

型果蔬杀菌剂。Zhao 等^[55]发现使用处理电压为 2.8 kV 的等离子体活化 20 min 得到的等离子体活化水, 可有效减少双孢菇表面大肠杆菌数量, 起到较好保鲜效果。电解水和等离子体活化水保鲜技术具有无污染、制取方便、成本低和短时高效的优点。但酸性电解水作为含氯消毒剂和等离子体活化水中存在活性氧化剂会引发人们对其安全性的担忧, 未来需对其潜在的毒理学作用进行全面评估, 建立和完善相关标准和技术参数以期实现在食用菌保鲜上的推广应用。

2.3 生物保鲜技术

2.3.1 生物涂膜保鲜 生物涂膜保鲜是利用生物体中提取的多糖类(壳聚糖、海藻酸钠和黄原胶等)、脂类(蜂胶、蜂蜡和米糠蜡等)和蛋白类(大豆蛋白、乳清蛋白和玉米蛋白等)等物质涂抹或喷淋在果蔬表面, 风干后形成保护膜, 起到杀菌作用, 减少水分蒸发, 抑制呼吸强度, 提升贮藏品质^[56]。商立超^[57]以卡拉胶、V_C和乳酸链球菌素对双孢菇进行涂膜处理, 可有效维持双孢菇营养成分和抗氧化能力。近年来, 国内外开发出一些新型涂膜剂。Liu 等^[58]将壳聚糖化学改性制备出壳聚糖-原儿茶酸接枝共聚物, 发现其对李斯特菌和沙门氏菌等的抑制效果及对杏鲍菇保鲜效果明显优于壳聚糖。生物涂膜保鲜具有效果好、安全性高的优点, 但蛋白质和多糖亲水性较强, 在高湿度环境下易吸潮发黏, 限制其应用, 因此需合理调节多糖和蛋白质等的比例来调节膜的阻气性、抗水性和机械强度等性质, 满足不同食用菌保鲜的需求, 起到更好的保鲜作用。且涂膜保鲜对原料和卫生条件要求较高, 导致成本高昂, 目前较少应用于食用菌商业化保鲜。

2.3.2 植物提取物保鲜 植物提取物保鲜是从天然植物中提取具有生物活性的物质, 这些物质具有广谱

的抑菌和抗氧化作用,起到对食用菌的保鲜作用。目前主要集中于香辛料和植物精油的研究。用于保鲜的香辛料包括生姜、大蒜、肉桂和迷迭香等。研究表明大蒜和生姜提取液浸泡处理双孢菇可延缓褐变和营养损失,延长双孢菇贮藏期^[59]。Hu 等^[60]发现,4-羟基肉桂酸能与底物羟基竞争酶活性位点抑制酪氨酸酶活性,抑制双孢菇褐变。精油的主要活性成分为肉桂醛、柠檬醛和丁香酚等,对霉菌等有很好的抑制作用^[61]。Qu 等^[62]研究发现使用 20 $\mu\text{L/L}$ 薄荷精油熏蒸处理双孢菇,能降低褐变相关基因的表达,提高抗氧化能力,延缓双孢菇衰老。植物提取物保鲜技术安全性高,效果好,但目前对其有效保鲜成分纯化不够精细,用量确定也有待完善,且价格较高。因此,未来需加强植物提取物的提取技术研究,探索确定其用量并加强与其他保鲜技术结合的应用研究,实现有效降低成本来加速其应用推广。

2.3.3 微生物防腐剂保鲜 微生物防腐剂是从微生物体内提取或利用微生物代谢获取,能抑制有害微生物生长,延缓果蔬腐烂。常见的微生物防腐剂有乳酸链球菌素、纳他霉素和 ϵ -聚赖氨酸。乳酸链球菌素能杀灭革兰氏阳性菌;纳他霉素能抑制大部分霉菌、酵母和真菌的生长,还能减少真菌毒素的生成; ϵ -聚赖氨酸具有广谱抑菌性,其中对霉菌、细菌、革兰氏阴性和阳性菌抑制作用最强^[63]。在实际应用中为提高抑菌活性,降低用量,微生物防腐剂常与其它保鲜剂或保鲜技术联合使用。Jiang^[64]采用 0.5 mmol/L 纳他霉素和纯氧联合处理双孢菇,保鲜效果优于单一处理组。微生物防腐剂具有绿色安全和天然高效的优点,但生产技术要求高,且提炼技术仍需提高,导致成本高昂,较难推广应用。因此需加强其提取技术研究,并加强微生物防腐剂与其他保鲜技术的联合应用研究。

2.3.4 拮抗菌保鲜 拮抗菌保鲜技术是通过拮抗菌产生抗菌素、竞争营养物质和空间来抑制有害微生物,控制果蔬采后病害,起到保鲜作用^[65]。常用的拮抗菌主要有细菌、霉菌和酵母菌等,来源广泛,可避免长期使用化学药剂导致病原菌产生抗药性,且比化学保鲜剂更加安全。细菌中的枯草芽孢杆菌是优良的拮抗菌,可产生 70 多种抗菌物质,且具有安全性高、繁殖快、营养简单和贮藏时间长的优点,可高效抑制食用菌的绿霉病害^[66]。目前拮抗菌在多种果蔬保鲜上已有实验研究,但在食用菌保鲜上研究较少,需加强拮抗菌对食用菌的保鲜机理及其用量参数研究。拮抗菌发酵液对菌种的活力和安全性要求较高,技术要求较高导致成本高昂,未来可考虑将其制成稳定耐贮存的干粉状固体制剂,进一步优化拮抗菌固体制剂工艺和配方来降低成本,加速其推广应用。

3 结论与展望

3.1 目前食用菌品质评价和保鲜技术存在的问题

随着生活水平的提高,人们对食用菌的品质和

安全问题越来越重视,建立科学系统的品质评价方法和开发出高效、安全、成本低的保鲜技术极为迫切。目前我国食用菌安全标准不完善,虽然食用菌品质评价指标较多,但未系统提出各个指标的等级标准和统一的食用菌品质评价标准,品质评价以有损检测为主,评价方法较为单一,亟待建立可定量、系统的品质评价方法。

食用菌保鲜技术研究虽取得了一些成果,但商业化应用中仍以低温气调包装保鲜为主,保鲜效果不能满足食用菌产业需要,且各种保鲜技术仍有不足,需要优化改进。比如,低温保鲜需要冷库等设备且能耗大,需加强管理减少温度波动;辐射保鲜需严格控制辐射剂量,运行管理成本和操作要求较高;气调保鲜效果较好,但人工气调需要气调库等设备,成本高昂,自发气调亟待研发出无污染高选择性的包装材料;失水处理会导致经济损失,需开发失水率低且高效的处理工艺;化学保鲜技术中一些保鲜剂易残留引发安全问题,而臭氧需控制其浓度减少对食用菌的伤害,安全性高且处理剂量合理的化学保鲜技术可进行应用推广;生物保鲜成本较高,且部分生物保鲜剂如植物精油稳定性不好,适合挑选稳定性高的生物保鲜剂与其它保鲜技术联合使用降低成本。目前食用菌保鲜技术的研究不够深入,应用于商业化的保鲜技术仍较少,新的保鲜技术推广效果较差,而成熟保鲜技术仍存在许多缺陷。

3.2 展望

在食用菌品质评价因素方面,建议强化以下四方面:一是逐步建立起与国际接轨的食用菌质量安全标准。同时收集品质高的常见食用菌,对其色泽、质地和气味等进行感官评价,测定形态和开伞度等感官特性,蛋白质和多糖等内在品质指标,以及农药、重金属、添加剂残留和微生物数量等安全性指标,采用色差仪和质构仪分析色泽和质构,气相色谱和液相色谱法测定风味和滋味物质。通过对食用菌感官品质、内在品质和安全性指标进行主成分分析和聚类分析等,明确影响食用菌品质的关键特征指标,制定食用菌品质评价标准。二是应进一步验证感官仿生技术和无损检测技术评价模型的重复性和通用性,加强相应便携式仪器的开发。三是加强基于蛋白质、多糖等营养物质代谢过程的代谢组学和蛋白组学研究。四是加强生物酶和光降解农药等绿色安全的农药消解技术、食用菌耐受重金属的机制、食用菌添加剂用量确定和高效处理工艺、食用菌栽培环境及栽培工艺对其微生物污染风险影响的研究。

基于食用菌产业保鲜技术现状,建议强化以下四方面:一是在产地开设加工厂,并提出成熟规范的采摘与分级、清洗消毒和真空预冷等食用菌采后预处理技术集成,通过有效的预处理避免食用菌采后二次污染。二是新技术的应用研究。一方面,加强包装材料乙烯渗透性研究,开发兼具高选择性、高机械强

度和易降解的新型包装材料,研发装备传感器的智能包装材料监控贮藏环境的温湿度等信息也可作为未来的一个研究方向。另一方面,基于天然无毒的生物活性物质和拮抗菌等开发新型绿色安全的保鲜剂。此外,应加强磁场保鲜和电场保鲜等新型技术处理参数和保鲜机理研究,加速新型保鲜技术应用推广。三是对现有成熟技术的优化,对低温保鲜和辐射保鲜等设备进行改进,降低能耗、成本和操作难度,提高生物保鲜剂的提取技术降低成本,加速成熟技术应用。四是复合保鲜技术应用研究,应重点加强辐射保鲜和生物保鲜等成本较高的保鲜技术与其他保鲜技术的复合应用研究,通过多种保鲜剂或保鲜技术相结合起到协同增效作用,弥补单一保鲜技术的缺陷,减少投资,提升贮藏效果。

参考文献

- [1] 贺国强,魏金康,胡晓艳,等.我国食用菌产业发展现状及展望[J].蔬菜,2022(4):40-46. [HE G Q, WEI J K, HU X Y, et al. Present situation and prospect of edible fungi industry development in China[J]. Vegetables, 2022(4): 40-46.]
- [2] 鲍大鹏,邹根,裴晓东,等.中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J/OL].食用菌学报:1-8 [2022-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1683.s.20220718.1606.002.html>. [BAO D P, ZOU G, PEI X D, et al. Discussion on the path toward high quality modernization of edible fungi industry in China[J/OL]. Acta Edulis Fungi, 1-8 [2022-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1683.s.20220718.1606.002.html>.]
- [3] 张忠子.食用菌食品的营养价值及保健功能分析[J].中国食用菌,2019,38(8):135-137. [ZHANG Z Z. Analysis of nutritional value and health function of edible fungi food[J]. Edible Fungi of China, 2019, 38(8): 135-137.]
- [4] XUE Z H, HAO J F, YU W C, et al. Effects of processing and storage preservation technologies on nutritional quality and biological activities of edible fungi: A review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(3): 1.
- [5] KHOJAH E, SAMI R, HELAL M, et al. Effect of coatings using titanium dioxide nanoparticles and chitosan films on oxidation during storage on white button mushroom[J]. Crystals, 2021, 11(6): 603.
- [6] 夏紫茜,李辣梅,严涵,等.食用菌采后保鲜研究进展[J].中国果菜,2021,41(5):15-22. [XIA Z Q, LI L M, YAN H, et al. Research progress on postharvest preservation of edible fungi[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(5): 15-22.]
- [7] 孟德梅,奚志媛,张亚璇,等.两种采收期香菇营养品质和抗氧化能力比较[J].中国食品学报,2018,18(4):228-234. [MENG D M, XI Z Y, ZHANG Y X, et al. Comparison of nutritional quality and antioxidant ability of *Lentinus edodes* at two harvest times[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(4): 228-234.]
- [8] 李润,杨焱,刘晓风,等.食用菌风味影响因素及其评价研究进展[J].食用菌学报,2020,27(4):202-214. [LI R, YANG Y, LIU X F, et al. Research progress on influential factors and evaluation of edible fungi flavor[J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(4): 202-214.]
- [9] 陈万超,李文,吴迪,等.11个主栽品种香菇可溶性糖和有机酸测定及滋味品质评价[J].食品工业科技,2022,43(7):273-279. [CHEN W C, LI W, WU D, et al. Determination of soluble sugar and organic acid components and evaluation of taste quality of 11 main cultivars of *Lentinula edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 273-279.]
- [10] 刘芹,孔维丽,崔筱,等.基于模糊数学和聚类分析的香菇品种综合品质评价[J].中国瓜菜,2021,34(11):37-46. [LIU Q, KONG W L, CUI X, et al. Comprehensive quality evaluation of *Lentinula edodes* using fuzzy mathematics and cluster analysis[J]. Zhongguo Gua-cai, 2021, 34(11): 37-46.]
- [11] 徐傲.18种商业化栽培食用菌营养价值及特点研究[D].扬州:扬州大学,2022. [XU A. Study on nutritional value and characteristics of 18 commercial cultivated edible mushrooms[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
- [12] 罗晓莉,张沙沙,严明,等.云南8种栽培食用菌蛋白质和氨基酸分析及营养价值评价[J].食品工业,2021,42(8):328-332. [LUO X L, ZHANG S S, YAN M, et al. Protein and amino acid analysis and nutritional value evaluation of eight cultivation edible fungi in Yunnan province[J]. The Food Industry, 2021, 42(8): 328-332.]
- [13] 农业农村部农产品质量安全监管局. NY/T 749-2018 绿色食品 食用菌[S].北京:中国农业出版社,2020. [Agricultural Product Quality and Safety Supervision Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs. NY/T 749-2018 Green food edible fungus[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.]
- [14] 董慧,李晓贝,张艳梅,等.食用菌品质评价研究浅析[J].上海农业学报,2020,36(3):146-150. [DONG H, LI X B, ZHANG Y M, et al. Research progress on quality evaluation of edible fungi[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, 36(3): 146-150.]
- [15] JERZY F, ROLAND T, DANIELA M. Distribution and bio-concentration of some elements in the edible mushroom *Leccinum scabrum* from locations in Poland[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2021, 56(4): 11-18.
- [16] 商雅茹.食用菌质量安全风险评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2016. [SHANG Y R. Research on edible fungus quality safety risk assessment[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016.]
- [17] 霍永红,蒋沙沙,李德海,等.食用菌污染因素分析及风险评估研究进展[J].食品安全质量检测学报,2022,13(10):3156-3163. [HUO Y H, JIANG S S, LI D H, et al. Research progress on factors analysis and risk assessment of pollution in edible fungi[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(10): 3156-3163.]
- [18] ZUZANA Z, JÚLIUS Á, MARTIN H, et al. Heavy metals determination in edible wild mushrooms growing in former mining area -Slovakia: Health risk assessment[J]. Potravinárstvo, 2016, 10(1): 37-46.
- [19] 李成华.壳聚糖及其衍生物涂膜保鲜双孢蘑菇效果的研究[D].武汉:华中农业大学,2009. [LI C H. Study on effects of chitosan and its derivatives coating preservation on *Agaricus bisporus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.]
- [20] 鲁焱兴.真空预冷技术与气调包装延长香菇保藏期的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2020. [LU Y X. Extending Shelf life of *Lentinus edodes* by vacuum pre-cooling and modified atmosphere packaging[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020.]
- [21] CUI K B, ZHAO H D, SUN L N, et al. Impact of near freezing temperature storage on postharvest quality and antioxidant capacity of two apricot (*Prunus armeniaca* L.) cultivars[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(7): 12857.
- [22] 张辉,乔勇进,张娜娜,等.冰温贮藏过程中蟹味菇几种营养成分变化的动力学特征[J].现代食品科技,2014,30(4):124-129,

153. [ZHANG H, QIAO Y J, ZHANG N N, et al. The reaction kinetics of the change of nutrition ingredients in crab flavor mushroom during ice-temperature storage[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(4): 124–129, 153.]
- [23] ÂNGELA F, AMILCAR L A, BEATRIZ O, et al. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: A review[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 641–650.
- [24] 刘超, 徐宏青, 王宏, 等. 蘑菇辐照保鲜贮藏技术的研究[J]. *核农学报*, 2003(5): 363–366. [LIU C, XU H Q, WANG H, et al. Fries-keeping of mushroom by irradiation[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2003(5): 363–366.]
- [25] 张娟琴, 邢增涛, 白冰, 等. 电子束辐照对双孢菇采后品质的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(1): 88–92. [ZHANG J Q, XING Z T, BAI B, et al. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(1): 88–92.]
- [26] 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.
- [27] LAGNIKA C, ZHANG M, MOTHIBE K J. Effects of ultrasound and high pressure argon on physico-chemical properties of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 82: 87–94.
- [28] 史君彦, 王清, 高丽朴, 等. LED白光照射对平菇采后贮藏品质的影响[J]. *北方园艺*, 2018(3): 154–158. [SHI J Y, WANG Q, GAO L P, et al. Effect of white LED irradiation on postharvest storage quality of *Pleurotus ostreatus*[J]. *Northern Horticulture*, 2018(3): 154–158.]
- [29] YE J J, LI J R, HAN X X, 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.
- [30] 刘云云. MAP双孢菇流通过程中货架期预测模型研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017. [LIU Y Y. Studies on prediction models for shelf-life of modified atmosphere packing *Agaricus bisporus* at circulation processing[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.]
- [31] 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. [WANG X Y, ZHANG H, LI L, et al. Influences of high oxygen atmosphere follow-up effect on shelf-life of *Agaricus bisporus*[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 309–316.]
- [32] 任浩. 短期厌氧气调对双孢蘑菇采后生理及品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021. [REN H. Effects of short-term anaerobic treatment combined with modified atmosphere packaging on the postharvest physiology and the quality of *Agaricus bisporus* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2021.]
- [33] 张松阳. 不同包装材料对草菇保鲜效果的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(9): 173–175, 178. [ZHANG S Y. Influences of different package materials on the fresh-keeping effect of *Volvariella volvacea*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(9): 173–175, 178.]
- [34] 陈淑慧, 王彦, 赵丹, 等. 膜材料在果蔬自发气调过程中的应用及发展[J]. *膜科学与技术*, 2022, 42(3): 153–162. [CHEN S H, WANG Y, ZHAO D, et al. Application and development of membrane materials in modified atmosphere packaging of fruits and vegetables[J]. *Membrane Science and Technology*, 2022, 42(3): 153–162.]
- [35] WRONA M, BENTAYEB K, NERÍN C. A novel active packaging for extending the shelf-life of fresh mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. *Food Control*, 2015, 54: 200–207.
- [36] CAI M, ZHONG H Z, MA Q H, et al. Physicochemical and microbial quality of *Agaricus bisporus* packaged in nano-SiO₂/TiO₂ loaded polyvinyl alcohol films[J]. *Food Control*, 2022, 131: 108452.
- [37] 陈文君. 以PBAT为基材的活性包装薄膜制备及其在双孢菇保鲜中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022. [CHEN W J. Preparation of active packaging film based on PBAT and its application in preservation of white mushroom (*Agaricus bisporus*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.]
- [38] ZHAO X M, WANG Y D, ZHANG Z Y, et al. Postharvest short-time partial dehydration affects shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) storage quality and umami taste[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110274.
- [39] 杨晋恒. 不同处理对香菇采后品质及生理的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [YANG J H. Effects of different treatments on postharvest quality and physiology of *Lentinula edodes* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [40] 赵松松, 韩馨仪, 刘斌, 等. 交变磁场抑制香蕉冷害的作用机理分析[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(3): 739–745. [ZHAO S S, HAN X Y, LIU B, et al. Mechanism analysis on the action of alternating magnetic field in inhibiting chilling injury of bananas[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(3): 739–745.]
- [41] 杨未尧. 双孢蘑菇联合保鲜技术研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020. [YANG M Y. Study on the combined preservation technology of *Agaricus bisporus* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.]
- [42] MOENS L G, VAN W J, DE L E, et al. Effect of postharvest storage on potato (*Solanum tuberosum* L.) texture after pulsed electric field and thermal treatments[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021, 74: 102826.
- [43] YAN M, YUAN B, XIE Y, et al. Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 166(C): 111230.
- [44] 孟晓曼, 孙亚男, 程儒杨, 等. 低压静电场/真空协同保鲜对白玉菇采后品质和抗氧化代谢的影响[J/OL]. *食品科学*: 1–13 [2022-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220224.2159.048.html>. [MENG X M, SUN Y N, CHENG R Y, et al. Effects of low-voltage electrostatic field/vacuum co-treatment on postharvest quality and antioxidant metabolism of white *Hypsizygus marmoreus* during storage[J/OL]. *Food Science*: 1–13 [2022-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220224.2159.048.html>.]
- [45] SUN B X, CHEN X, XIN G, et al. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on quality of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) packaged in different packaging materials[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 159(C): 111023.
- [46] JUAN S, CLAUDIA J, REINALDO C V, et al. Effect of the application timing of 1-MCP on postharvest traits and sensory quality of a yellow-fleshed kiwifruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 244: 82–87.
- [47] 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. [LIU Y. Study on physio-biochemical changes associated with browning and preservation technology on *Agaricus bisporus* during storage[D]. Wuhan:

Huazhong Agricultural University, 2010.]

[48] 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. [LI Y Y. Effect of ethanol fumigation on quality maintenance of *Agaricus bisporus*[D]. Chongqing: South-west University, 2017.]

[49] KHAN Z U, BU J W, KHAN N M, et al. Integrated treatment of CaCl_2 , 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.

[50] 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): 93–96, 109. [WANG Z G, YANG H, ZHU G C, et al. Effect of composite preservative on post-harvest fresh-keeping of *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(1): 93–96, 109.]

[51] 杜传来, 易克传, 陈龙彬. 几种绿色保鲜技术对双孢菇保鲜效果的比较[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(1): 5–8, 59. [DU C L, YI K C, CHEN L B. Comparison on effects of several green fresh-keeping for *Agaricus bisporus*[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2011, 29(1): 5–8, 59.]

[52] WANG T, YUN J M, ZHANG Y, et al. Effects of ozone fumigation combined with nano-film packaging on the postharvest storage quality and antioxidant capacity of button mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 176: 111501.

[53] 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.

[54] DING T, RAHMAN S, OH D H. Inhibitory effects of low concentration electrolyzed water and other sanitizers against food-borne pathogens on oyster mushroom[J]. *Food Control*, 2011, 22(2): 318–322.

[55] ZHAO Z T, WANG X Y, MA T J. Properties of plasma-activated water with different activation time and its effects on the quality of button mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. *LWT*, 2021, 147: 111633.

[56] 姚依妮, 孙建明, 李昭, 等. 可食性涂膜在番茄贮藏保鲜中的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5): 55–61. [YAO Y N, SUN J M, LI Z, et al. Progress in research of edible coating in the storage and preservation of tomato[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2021, 39(5): 55–61.]

[57] 商立超. 一种双孢菇复合生物保鲜剂的研制及保鲜效果研

究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [SHANG L C. Preparation of a compound biological preservative for *Agaricus bisporus* and study on its preservative effect[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]

[58] 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.

[59] 张强, 王松华, 祝端巍, 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 Q, WANG S H, ZHU E W, et al. Effects of two compound preservatives on *Agaricus bisporus*[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2431–2435, 2558.]

[60] 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.

[61] 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.

[62] 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.

[63] 周荣雪, 陈山乔, 马文静, 等. 微生物防腐剂在食品工业中的应用[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(1): 15–17. [ZHOU R X, CHEN S Q, MA W J, et al. Application of microbial food preservative in food industry[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(1): 15–17.]

[64] JIANG T J. Effect of natamycin in combination with pure oxygen treatment on postharvest quality and selected enzyme activities of button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(10): 2562–2568.

[65] 陈心怡, 周炜凯, 刘萍茹, 等. 拮抗微生物在水果保鲜上的应用研究[J]. 现代食品, 2020(22): 143–144, 157. [CHEN X Y, ZHOU W K, LIU P R, et al. Research on the application of antagonistic microorganisms in preservation of fruits[J]. *Modern Food*, 2020(22): 143–144, 157.]

[66] 杨武, 王威, 向世海, 等. 一株食用茵绿霉病菌拮抗菌株的分离与鉴定[J]. 中国食用菌, 2020, 39(1): 55–60. [YANG W, WANG W, XIANG S H, et al. Isolation and identification of an antagonistic strain against green mold of edible fungi[J]. *Edible Fungi of China*, 2020, 39(1): 55–60.]