

崔国梅, 李顺峰, 高帅平, 等. 香菇采后品质劣变与保鲜技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 460–468. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030001

CUI Guomei, LI Shunfeng, GAO Shuaiping, et al. Research Progress on Postharvest Quality Deterioration and Preservation Technologies of *Lentinus edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 460–468. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030001

· 专题综述 ·

香菇采后品质劣变与保鲜技术研究进展

崔国梅, 李顺峰, 高帅平, 刘丽娜, 田广瑞, 魏书信, 许方方, 王安建*

(河南省农业科学院农副产品加工研究所, 河南郑州 450002)

摘要:鲜香菇 (*Lentinus edodes*) 因其水分含量高、呼吸和蒸腾作用强、易受微生物污染而在贮藏和运输过程中容易出现水分、营养及风味损失, 组织褐变、腐烂及开伞老化等现象, 严重限制了香菇保鲜产业发展。因此, 本文概述了上述现象产生的原因, 综述了香菇保鲜技术研究现状、作用原理及成效, 包括物理保鲜 (低温保鲜、气调保鲜、冷杀菌保鲜)、化学保鲜、生物保鲜及复合保鲜技术, 归纳了香菇采后劣变及保鲜技术相关研究中存在的问题并做出展望, 为香菇采后保鲜技术的研究方向及绿色保鲜产品的开发提供参考。

关键词:香菇, 采后, 劣变因素, 劣变原因, 保鲜技术

中图分类号:S646.1*2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)02-0460-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030001



本文网刊:

Research Progress on Postharvest Quality Deterioration and Preservation Technologies of *Lentinus edodes*

CUI Guomei, LI Shunfeng, GAO Shuaiping, LIU Lina, TIAN Guangrui, WEI Shuxin, XU Fangfang, WANG Anjian*

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

Abstract: Fresh *Lentinus edodes* was extremely susceptible to a series of deterioration phenomena such as loss of water, nutrition and flavor, tissue browning, decay, umbrella opening and aging in the process of storage and transportation, due to its high water content, strong respiration and transpiration, microbial contamination, etc. The deterioration phenomenon mentioned above severely limited the development of the preservation industry of *L. edodes*. Therefore, this paper summarizes the causes of phenomena mentioned above, and also reviews the preservation technologies on *L. edodes*, including physical preservation (low temperature preservation, modified atmosphere preservation, cold sterilization preservation), chemical preservation, biological preservation and compound preservation, etc. The research progress, principle and effects of these preservation technologies on *L. edodes* are also reviewed. The problems existing in the research of postharvest deterioration and preservation technology on *L. edodes* are summarized and the prospect is made. This review would provide references for the research direction of postharvest preservation technology and the development of green preservation products on *L. edodes*.

Key words: *Lentinus edodes*; postharvest; deteriorating factor; deterioration reason; preservation technology

香菇(*Lentinus edodes*), 又名冬菇、香蕈、花菇、椎茸, 是一种食药两用的大型真菌, 采后由于自身生理特点及外界环境因素等影响, 衰老程度不断加深^[1-2], 品质极易劣化, 商品价值降低, 严重制约了香菇保鲜产业的发展。香菇保鲜主要指采用理化方

法、生物方法及复合保鲜技术, 使香菇的生命活动处于最低状态, 借以延长保鲜贮藏时间, 保持鲜菇的食用价值及商品价值。香菇保鲜技术有助于延长鲜菇保鲜期、实现错峰销售及远距离运输、提高菇农收益等, 对香菇产业的发展至关重要^[3]。

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 河南省重大公益专项项目 (201300110700); 河南省科技攻关项目 (212102110199); 河南省农业科学院科技创新团队专项 (2022TD35)。

作者简介: 崔国梅 (1985-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 农产品保鲜与加工, E-mail: 420818320@qq.com。

* 通信作者: 王安建 (1969-), 男, 硕士研究生, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: jgs1525@126.com。

目前,香菇常见的保鲜技术有低温冷藏、冷杀菌保鲜、气调保鲜、化学保鲜、生物保鲜和涂膜保鲜等,但这些方法中有的方法简单但达不到预期效果,有的效果好但操作复杂或者投入运行成本高^[4-5]。随着人们对鲜香菇减损保质的研究不断深入,香菇品质劣变的诱因及机制不断深入,相应的保鲜技术也日益成熟。本文介绍了鲜香菇采后品质劣变的诱因及机制,总结了香菇保鲜技术原理及研究现状,以期对香菇保鲜技术研究提供新思路,为开发香菇保鲜新技术提供参考。

1 香菇采后品质劣变

香菇受自身因素及外界环境因素等影响,采后感官品质及营养品质等迅速劣变,导致其商品价值严重降低。图 1 简要概述了香菇采后品质劣变现象与影响因素的交互关系,呼吸作用、蒸腾作用、无保护组织等是香菇品质劣变的内在因素,而温度、湿度、氧含量等属于影响香菇品质劣变的外在因素。

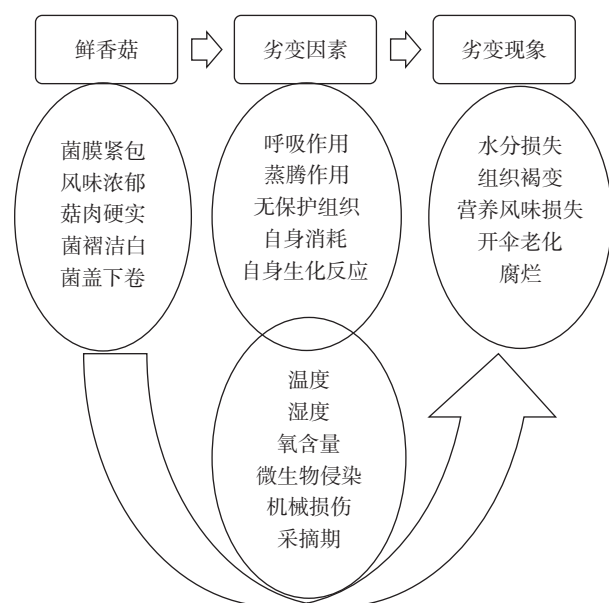


图 1 香菇采后品质劣变与影响因素的交互作用
Fig.1 Factors affecting postharvest quality deterioration of *Lentinus edodes*

1.1 水分损失

鲜香菇其水分含量一般在 85% 以上,且表面缺少防止水分散失的组织结构,在代谢活动的影响下水分快速流失,而采后呼吸作用、蒸腾作用及机械损伤是香菇水分损失的重要因素。

呼吸作用是导致香菇水分损失的一个因素^[6]。香菇属于呼吸跃变型,采摘后的子实体代谢活动和呼吸作用仍较旺盛,呼吸作用将有机物分解为 CO_2 和 H_2O ,同时消耗部分水分并释放出能量。但因呼吸作用导致的水分损失相对较少,且随贮藏温度的降低和气调环境的形成,损失会越来越小。

蒸腾作用是导致香菇采后水分损失的主要因素^[7]。鲜香菇的成熟度是影响蒸腾作用的其一原因,幼嫩香菇组织尚未发育成熟,干物质含量少,蒸腾失

水较快。随着香菇的生长成熟,组织逐渐变得充实,蒸腾强度相对降低,水分损失有所下降^[8]。环境因素是影响香菇蒸腾作用的另一原因,比如温度、湿度和空气流速等。温度是通过影响香菇代谢而影响蒸腾作用,随着温度的降低蒸腾作用减弱,随温度升高而加快。湿度是通过空气中水蒸气饱和压力差对蒸腾作用产生影响,并在一定温度条件下,空气中的湿度越小,蒸腾作用越大,反之越小^[9]。空气流动能够带动鲜香菇表面水分子运动,空气流速越大,蒸腾作用越剧烈,其水分损失越快。

机械损伤是鲜香菇水分损伤的另一因素。贮藏运输过程中容易发生机械损伤,该部位则需愈伤组织去修补,故此处细胞的呼吸速率会比原来完整细胞快得多,从而造成水分大量损失。Paudel 等^[10]研究发现,食用菌保持水分的能力与细胞结构的完整性有关,其细胞结构的完整可以降低水分的损失。

水分损失导致鲜香菇品质下降,但适当的失水操作能够有效抑制微生物的生长增殖及酶促褐变,减少营养物质的损失,提高其贮藏品质^[11]。王玉迪^[12]曾就热泵处理不同水分损失对香菇品质的影响进行了系统的研究,其研究表明 20℃ 贮藏温度下,失水 10% 可有效维持采后品质、抑制香菇采后的褐变、减少挥发性成分的损失、延长鲜香菇的常温贮藏时间。所以为了延长鲜香菇的货架期,可通过包装或保鲜处理将水分损失控制在相对较低的水平。

1.2 营养风味损失

鲜香菇水分含量高、组织结构较为疏松,采后在常温下呼吸作用及新陈代谢旺盛,且不再有菌棒的营养和水分供应,在贮藏过程中只能通过消耗自身营养和水分来维持生理活动所需的能量,从而造成香菇营养品质的下降^[13]。孟德梅等^[14]曾研究,与开伞香菇相比,未开伞香菇具有较高的单菇重和较强的清除 DPPH 自由基的能力,且可溶性固形物、可溶性总糖和 7 种必需矿物质元素(除 Se 外)含量较高,体现出较高的营养价值和抗氧化能力。此外,在贮藏期间未开伞的鲜香菇,其可溶性蛋白质和可溶性总糖含量始终高于开伞的鲜香菇,且耐贮藏性更好。此外,抗坏血酸作为评定鲜香菇的营养品质和贮藏效果的指标之一,其含量有所下降^[15]。

1.3 组织褐变

组织褐变是鲜香菇常见品质下降的现象,褐变作用按不同的反应物、反应产物和反应方式可分为酶促褐变和非酶褐变,而酶促褐变是引起鲜香菇褐变的重要因素^[16],其主要原因是机械损伤等引起的细胞膜破裂,导致多酚氧化酶与酚类化合物的密切接触。在氧气充足时,酚类化合物在多酚氧化酶的催化作用下氧化成醌,再进一步发生氧化聚合反应,最终导致了褐色素的形成^[17-18]。所以在采收及运输过程中减少机械损伤有利于降低香菇采后褐变程度。降低温度和活性氧含量是抑制鲜香菇酶促褐变的另一有效

方法^[19]。张红娟等^[20]对香菇采后保鲜的研究发现,贮藏温度在4℃、2% O₂及11% CO₂的环境下能有效降低鲜香菇的呼吸速率及失重率,保持较好的品质,贮藏效果最佳。温度通过影响过氧化氢酶、过氧化物酶及超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性而影响食用菌的品质和色泽。一定温度范围内,温度越高,酶活性越大,褐变越快,反之则褐变越慢,因此低温有利于鲜香菇的贮藏,高温则会加速酶促褐变的进行^[21]。

针对鲜香菇的褐变,目前研究多集中在抑制多酚氧化酶等酶活性的研究,而鲜有研究能够深入到关键调控基因筛选与研究的程度。因此,未来应从基因水平对与其褐变有关的基因组序列进行研究,以期解决其褐变问题。

1.4 开伞老化与腐烂

开伞老化是一个很复杂的程序化过程,伴随着形态变化如开伞等及一系列生理生化变化如多糖与蛋白质降解、子实体木质化、组织褐变、各种营养素降解、有毒物质积累等^[22]。香菇采后老化一方面可能受自身基因的调控,香菇采后基因表达涉及到子实体老化、酪氨酸酶编码基因和漆酶基因表达、形态转变与其程序性的分子调控等,这些采后高表达的基因涉及到多种生理生化活动,最终导致子实体褐变、开伞及老化等^[23-24];另一方面也与贮藏环境有一定的关系,不宜的贮藏环境如高温低湿等都会对鲜香菇造成胁迫,从而加速了老化^[22]。研究导致香菇采后老化的因素有助于人们更有针对性地采取调控措施,提高香菇采后品质,延缓老化和褐变过程。

香菇采后受环境及自身因素的影响,其自身生理活动及附着微生物的代谢活动并未终止,不恰当的贮藏方式极易导致其腐烂变质。一是微生物侵染,这是鲜香菇腐烂的一个重要原因,因为采收后香菇水分充足营养丰富,菇体上或环境中的各种微生物迅速生长繁殖而导致菇体感染致病菌,在致病菌的作用下菇体逐渐软化腐烂^[25],因此抑制微生物侵染是香菇保鲜的重要手段;二是机械损伤,这是鲜香菇腐烂变质的又一重要原因,有研究表明鲜切香菇经过机械损伤后激发了自溶自噬机制,细胞内出现细胞壁断裂、细胞膜消融、细胞核消失、自噬体吞噬细胞器、DNA断裂及细胞解体等现象,微观结构遭到严重破坏^[26],因此防止机械损伤是香菇保鲜的必然要求;三是呼吸作用,这也是鲜香菇腐烂软化的重要因素。香菇采后不断地从外界吸收氧气,并将自身的有机物分解、氧化,使其逐步衰老软化,因此通过低温气调等手段降低呼吸作用是香菇保鲜的另一重要手段。

2 香菇保鲜技术

香菇不同的保鲜方法其侧重点有所不同,但其保鲜机理主要概况为以下三个方面:降低呼吸作用和新陈代谢强度,延缓老化和褐变;抑制蒸腾作用,减少水分损失;抑制腐败菌和致病微生物的生长繁殖^[27]。鲜香菇常见的保鲜技术有物理保鲜(低温保鲜、气调

保鲜、冷杀菌保鲜)、化学保鲜、生物保鲜及复合保鲜等,而现实中经常是以低温保鲜为基本条件,两种或者几种手段并用,达到协同保鲜防止微生物侵染等多重效果。

2.1 物理保鲜

2.1.1 低温保鲜 低温保鲜是通过降低贮藏环境温度达到抑制鲜香菇的新陈代谢活动和微生物生长,并在一定时间内保持其色泽、风味等品质的保鲜技术。低温可以有效降低自身及微生物的酶活性从而达到抑制自身生理生化活动和微生物繁殖的目的,但是低温保鲜温度设定不宜过低,贮藏、运输和销售时冷藏温度最好应控制0~4℃,避免对其造成冻害。鲜香菇生理生化反应活性受温度影响较大,在5~35℃范围内,每升高10℃其呼吸强度增强1~1.5倍,且温度越高保鲜效果越差。孟令伟等^[28]研究在20℃的条件下,鲜香菇贮藏4d便腐烂;在13℃及4℃条件下,贮藏期分别可达7和10d。赵爽等^[26]发现低温则有利于减缓鲜香菇因机械损伤而导致的蒸腾作用、软化、褐变以及抗氧化能力下降等应激反应以及细胞质构的变化。所以低温贮藏是鲜香菇保鲜的有效方法之一,但贮藏过程中温度的波动会对其品质造成严重影响^[29],在贮藏运输销售等各环节要控制好温度,防止温度频繁波动对菇体品质造成影响。

低温保鲜技术除了冷藏保鲜,还有速冻保鲜和真空冷冻干燥保鲜,速冻保鲜是借助快速降温使菌体水分急速结晶,导致子实体温度急剧下降,从而达到延长保鲜期限。速冻保鲜能够最大限度地保持食用菌原有的新鲜度、色泽和营养成分,是被大家公认的绿色贮藏保鲜方法^[5]。真空冷冻干燥保鲜技术可对食用菌的色、形、风味及营养成分进行较长时间的有效锁定,保鲜效果比较好^[30],但成本相对较高。

2.1.2 气调保鲜 气调保鲜是通过调整贮藏环境中的氧气及二氧化碳的浓度比例,从而达到延缓衰老,减缓褐变,延长保鲜期的目的。贮藏环境中的气体成分组成会影响香菇的呼吸速率,低O₂、高CO₂能够抑制其呼吸速率及代谢活动,但由于鲜香菇的呼吸速率远高于其他果蔬^[31],环境中的O₂很快被耗完且生成高浓度CO₂,导致其出现CO₂伤害及异味物质的积累^[32],同时低O₂环境还易诱发微生物侵染^[33]。气调保鲜则是应对上述问题的有效方法,有研究表明,90% O₂及10% CO₂处理可以明显降低鲜香菇的呼吸速率,减少失重率、抑制乙醇、乙醛等异味物质的积累,延缓呼吸高峰的到来及褐变、软化等发生,显著减少霉菌等致病菌引起的采后病害。但是不适宜的O₂/CO₂比例反而加速了鲜香菇软化、褐变、异味和老化,缩短其贮藏期^[21]。

自发性气调保鲜包装技术主要利用保鲜膜的透气性,使保鲜袋内保持稳定的低氧和一定二氧化碳浓度的环境,从而抑制呼吸,延缓衰老。但其能否顺利转化应用的关键是所选用包装材料的透气性及透湿

性等性能^[34]。单一材质容易出现透气性差或透湿性不好等问题,在实际生产中则会根据不同材料性状选用两种或以上的膜复合使用,以达到取长补短,协同增效的目的^[35-36]。比如与高通透性的聚氯乙烯膜相比,中通透性聚乙烯膜及低通透性的聚偏二氯乙烯和聚乙烯的共聚物膜均可显著地降低鲜香菇失重率,抑制呼吸速率,延缓细胞膜渗透率升高,控制其多糖及V_C含量的降低^[37]。聚乳酸是以乳酸为主要原料聚合得到,原料来源充分而且可再生,生产过程无污染,且可生物降解,是理想的绿色高分子材料。但因其气体阻隔性及热力学性能较差限制了其应用,而将聚乳酸与纳米材料二氧化钛复合后能够显著地提高聚乳酸的抑菌能力及透气性。曾丽萍等^[38]曾研究发现,3% 聚乳酸与纳米材料二氧化钛复合膜能够较好地维持鲜香菇的感官品质,减少水分散失并抑制呼吸强度。气调保鲜技术以其操作简单、适用范围广、贮藏保鲜期长、经济效益高等特点受到广泛青睐。目前,常见的气调保鲜技术有气调保鲜包装和气调保鲜冷库,但因建冷库成本投入较高,而气调包装相对则更为经济有效,并在应用中显出巨大潜力,是目前最为经济有效的手段之一。

2.1.3 冷杀菌保鲜技术 冷杀菌技术也被称为非热杀菌技术,杀菌过程中升温很小或是不升高,从而避免高温对食品产生的不良影响。通常用于香菇保鲜的冷杀菌技术有辐照杀菌、紫外线杀菌、臭氧杀菌和微波杀菌等,其作用机理及保鲜效果如表 1。

无论那种杀菌方式,其剂量及作用时间等都有一定的适用范围。有研究表明 1.0 kGy⁶⁰Co- γ 辐照射线、2.0 kGy⁶⁰Co- γ 射线和 3.0 kGy 电子束辐照处理可以较好地维持鲜香菇的理化特征,延长鲜香菇的货架期^[40-41],但姜天甲^[49]研究结果表明 2.0 kGy⁶⁰Co- γ 处理能够更好地减少微生物的侵染,但在鲜香菇的硬度、品质、功能性成分等指标上起到了相反的作用。何雨婷^[50]采用 130 W 微波输出功率连续照射处理鲜香菇 4 min,可以较好地保持鲜香菇贮藏品质。姜

积康等^[46]利用短紫外线照射采后香菇杀菌 5 min,可改善鲜香菇采后的保鲜效果,而 10 和 15 min 短波紫外线处理则起相反的作用。杨晋恒等^[43]研究表明在 4 ℃ 的贮藏条件下,臭氧浓度在 4.28 mg/m³ 时能够显著地维持鲜香菇的商品价值,然而臭氧浓度过高则容易导致香菇的代谢紊乱,其品质反而会下降。冷杀菌方式用时短、效率高、持续力强,有助于保持香菇色、香、味、营养及活性成分,是一种安全、高效杀菌方法,但对所使用的仪器、操作人员要求相对较高。

2.2 化学保鲜

化学保鲜技术是利用一定浓度的化学物质防止香菇品质劣变、延长货架期以达到保鲜的目的,该法成本低,操作方便,是常用的保鲜方法之一。常见的化学保鲜剂有乙烯抑制剂、二氧化氯及一些复合保鲜剂等,其作用效果如表 2。

1-甲基环丙烯(1-MCP)作为一种有效的乙烯产生和乙烯作用的抑制剂,它能够很好地与乙烯受体结合,但这种结合不会引起成熟的生化反应。因此,在内源乙烯产生或外源乙烯作用之前,施用 1-MCP,它会抢先与乙烯受体结合,从而阻止乙烯与其受体的结合,很好地延长了衰老延长保鲜期^[51]。二氧化氯是目前公认的安全、无毒的绿色杀菌剂,其杀菌机理可能是渗透和氧化细胞表面定位的蛋白质,或是对细胞壁有较强的吸附和穿透能力,放出原子氧将细胞内的含巯基的酶氧化起到杀菌作用^[52]。复合化学保鲜剂几种成分共同及相互作用能够起到协同增效的作用,可有效抑制鲜香菇的品质劣变,使鲜香菇在贮藏期间保持良好的品质,但其存在的残留问题,依然是人们心中的隐忧。

2.3 生物保鲜剂保鲜

生物保鲜剂是指从动物、植物或者微生物中提取的,或者利用工程技术方法取得的天然绿色无害的保鲜剂,具有抑制有害微生物生长,减缓呼吸强度,降低采后损失等效果。常用的一些生物保鲜剂有壳聚

表 1 冷杀菌技术作用机理及保鲜效果

Table 1 Mechanism and preservation effect of cold sterilization technology

冷杀菌技术	作用机理	保鲜效果
辐照杀菌	辐照杀菌机理一方面电离辐射破坏目标微生物的DNA,通过抑制DNA合成防止细胞分裂;另一方面是辐射与水分子相互作用产生活性分子,活性分子再与细胞内其他物质相互作用,最终导致细胞凋亡 ^[39] 。	减少微生物侵染,延缓鲜香菇组织软化和褐变,减少失重率,抑制呼吸强度,提高细胞膜完整性,延长鲜香菇的货架期 ^[40-41] 。
臭氧杀菌	臭氧杀菌通过臭氧和细胞膜脂类的双键反应,穿入菌体内部,作用于蛋白质和脂多糖,使细胞膜的通透性增加,细胞内物质溶出,DNA、RNA失去功能而死亡 ^[42] 。	减少微生物侵染,减少营养损失,延缓衰老,减轻过氧化程度,较好维持鲜香菇品质 ^[43] 。
紫外线杀菌	紫外线杀菌消毒是利用适当波长的紫外线能够破坏微生物机体细胞中的DNA或RNA的分子结构,从而引起菌体内蛋白质和酶合成障碍,造成生长性细胞死亡和(或)再生性细胞死亡,达到杀菌效果 ^[44-45] 。	减少微生物侵染,维持鲜香菇的感官品质,延缓多糖及V _C 的降解,抑制鲜香菇内源性甲醛的积累 ^[46] 。
微波杀菌	微波杀菌分为热效应和非热效应:一是微生物在微波场的作用下被极化并高频震荡产生热效应,导致蛋白质结构变化而死亡;二是微波使微生物带电导致体内蛋白质和生理活性物质发生变异,而丧失活力或死亡。另外,微波还可以导致细胞DNA和RNA分子结构发生变化,诱发基因突变,染色体畸变,从而中断细胞的正常繁殖能力 ^[47] 。	减少微生物侵染,又可显著降低失重率、呼吸速率、多酚氧化酶活性和丙二醛含量,抑制了鲜香菇褐变,保持较高的香菇多糖含量 ^[48] 。

注:微波杀菌属于热效应和非热效应共同作用的结果,但微波杀菌温度一般在70~80℃,低于常规杀菌温度,此处也归类到了冷杀菌技术。

表 2 化学保鲜剂在香菇保鲜中的应用

Table 2 Application of chemical preservatives in preservation of *Lentinus edodes*

化学保鲜剂	保鲜效果
1-甲基环丙烯 ^[51]	抑制鲜香菇多酚氧化酶活性,减缓褐变程度,提高·OH清除率,降低失水率,减缓品质劣变。
二氧化氯 ^[52]	杀灭微生物,保持鲜香菇中醇类、含硫化物、醛类等香气成分。
焦磷酸钠 ^[53]	延缓鲜香菇褐变及V _C 含量下降,降低呼吸强度及失重率。
柠檬酸+乳酸 ^[54]	降低鲜香菇呼吸强度和多酚氧化酶活性,延缓鲜香菇褐变及总酚含量和维生素C含量的降低。
L-半胱氨酸 ^[55]	抑制鲜香菇褐变和多酚氧化酶活性,延缓还原糖和可溶性蛋白的降解,具备较好的甲醛清除和保鲜作用。
H ₂ O ₂ +NaCl ^[53]	延缓鲜香菇褐变,降低呼吸强度及失重率,维持V _C 含量在较高水平。

糖、香辛料、植物精油、蜂胶、那他霉素等,其对鲜香菇保鲜的作用如表 3。

生物保鲜剂的作用机理与其来源有密切关系,来源不同机理也有差异:一是在香菇表面形成保护膜,降低蒸腾作用,防止微生物侵染,如壳聚糖的成膜作用,能够起到抑制或杀灭病害菌等保鲜防腐效果^[57];二是其含有抗菌活性成分,抑制腐败菌生长繁殖。如蜂胶因含有多酚类、萜类等抗菌物质及微生物生理代谢所产生的细菌素、有机酸、抗生素等多种抑菌成分;三是抑制相关酶活性,防止褐变,维持良好感官品质^[63-64]。如肉桂精油和百里香精油处理延缓褐变,降低多酚氧化酶和过氧化物酶的活性^[57];四是提高其抗氧化活性。如用肉桂醛精油熏蒸 1.5 h,香菇的抗氧化活性显著增加^[63]。近年来,生物保鲜剂理论应用研究得以重视且发展迅速,许多具有抗菌、抗氧化活性成分的生物资源被开发利用,其中复合生物保鲜剂和生物提取物等保鲜技术的发展势头迅猛,是目前的研究热点。

2.4 复合保鲜

新鲜的香菇其品质劣变受到了众多因素的影响,贮藏环境不易管控,单一的保鲜手段不易达到理想的保鲜效果。因此,在实际生产应用过程中多考虑采用两种或者多种保鲜方法,发挥不同保鲜方式的优势,利用协同增效的原理降低香菇品质劣变提升保鲜效果^[65]。生产中常见的复合保鲜技术有低温保鲜复合气调包装,低温保鲜联合涂膜保鲜,低温保鲜气调包装协同化学保鲜等。高帅平等^[66]研究了在 4℃ 条件下,PE 膜自发气调包装和高 CO₂ 控制气调保鲜可以不同程度地提高低温条件下香菇的贮藏品质,维持营养物质和抗氧化物质含量,缓解膜脂过氧化产物

的积累,抑制褐变反应。鲁焱兴^[67]研究利用真空预冷技术与气调包装来延长香菇保藏期,与室温下贮藏的香菇相比,其货架期能延长 20 d 以上。Jiang 等^[68]研究利用阿拉伯树胶复合那他霉素对香菇保鲜效果的影响,结果表明该复合保鲜剂能够抑制香菇呼吸强度及细胞膜透性,降低失重率,延缓褐变,维持香菇组织硬度,降低微生物数量,减少可溶性固形物、总糖和抗坏血酸损失,延长保鲜期。曾丽萍等^[38]研究发现在(4±1)℃ 条件下,PLA/TiO₂ 纳米复合膜能更好地维持香菇贮藏期间的感官品质,降低呼吸强度,减缓水分损失,维持较高 V_C 及还原糖含量。香菇复合保鲜技术能够达到优势互补,协同增效的作用,是深受人们关注的保鲜手段。

3 问题与展望

香菇是我国产量首次突破千万吨的菌类,据中国食用菌协会统计调查显示,2020 年香菇依然是年产量最大的品种,产量达 1188.21 万吨,比上年增长 72.26 万吨,增长 6.48%。香菇产业蓬勃发展,但香菇保鲜技术的研究应用方面却存在诸多问题,如劣变机理等基础研究薄弱,利用基因手段研究香菇老化褐变等问题不够成熟,香菇保鲜系统资料欠缺,技术集成不高,科学研究与生产脱节,成果转化较慢或转化率低,技术推广效果较差,或是技术工艺复杂,成本较高,操作不便等应用问题突出。目前,香菇保鲜仍以低温保鲜气调包装为主,手段单一,效果满足不了香菇产业快速发展的需要,因此香菇品质劣变机理的研究及新型保鲜技术的利用对香菇产业发展意义重大。

香菇劣变机理方面的研究建议持续加强:a.基因水平研究。建议对香菇褐变、老化等劣变相关的基因组序列进行研究,构建高效的遗传转化技术,从基

表 3 生物保鲜剂在香菇保鲜中的应用

Table 3 Application of biological preservatives on preservation of *Lentinus edodes*

生物保鲜剂	保鲜效果
壳聚糖+茶多酚 ^[56]	抑制鲜香菇衰老、减缓软化、减弱呼吸强度、降低失重率及V _C 损失。
壳聚糖、百里香油 ^[57]	维持鲜香菇组织硬度,抑制呼吸作用,降低微生物数量,减少总酚类和黄酮类等活性物质的损失。
那他霉素、阿拉伯胶 ^[58]	维持鲜香菇组织硬度,减少微生物数量,减少可溶性固形物、总糖及抗坏血酸的损失,延长保鲜期。
大蒜提取液 ^[59]	抑制鲜香菇的呼吸强度,降低失重率,改变细胞膜透性和减少腐烂率,延缓鲜香菇衰老腐败。
肉桂醛精油 ^[54,60]	延缓鲜香菇衰老,增加抗氧化活性,降低酚类化合物的含量。
肉桂精油和百里香精油 ^[61]	有效降低鲜香菇腐烂率,延缓鲜香菇褐变,抑制呼吸强度,降低多酚氧化酶和过氧化物酶活性,延长货架期。
蜂胶+L-半胱氨酸+柠檬酸 ^[62]	有效抑制褐变,降低失水率,抑制呼吸强度,减少营养损失,能延长货架期。

注:蜂胶+L-半胱氨酸+柠檬酸研究对象为双孢蘑菇。

因水平上掌握鲜香菇劣变机理与规律。b.劣变机理及规律研究。基于香菇品质劣变的诱因,研究香菇采后品质劣变机理,开发延缓或是抑制衰老的新技术,减少因生理活动导致的失水、褐变、组织软化等劣变问题。着重对香菇采后在不同环境条件下、不同生理阶段其品质劣变规律的研究,为香菇品质控制提供理论支持。c.系统性研究。深入系统研究香菇在不同生长阶段营养成分、风味物质及生物活性物质含量和组成变化与贮藏条件的关系,为香菇货架期预测及深加工提供理论依据。d.全程动态性研究。香菇全程动态保鲜技术集成研究,从生长期到采集、采后贮藏、再到运输、销售过程中影响香菇品质的因素进行系统研究分析,使得各环节无缝衔接,降低过程风险。

香菇产业保鲜技术方面的研究建议有以下几个方面:a.加强基因水平的研究。未来期望对与鲜香菇劣变有关的基因组序列进行研究,以期从更深水平上解决香菇老化褐变等问题。例如研究漆酶、多酚氧化酶等基因的转录表达在香菇老化褐变等方面的影响。利用基因手段改良品种获得耐性菌种,以期从育种方面解决鲜香菇劣变问题。b.新的应用技术研究。一方面,开发新型绿色安全的保鲜剂,比如以天然生物保鲜剂替代传统的化学保鲜剂,或是研究利用微生物拮抗保鲜技术,开发广谱、高效和稳定的生物抗菌剂。另一方面,研究新型高效保鲜应用材料,能兼具抗菌、保湿、降解、防霉、可食用等多种功能,为香菇气调保鲜提供技术和物质支撑。此外,创制高效杀菌设备及工艺,尤其是冷杀菌设备,使其向高效能、低耗能、低成本、便捷易控方向转变,从工艺优化及设备更新方面为香菇保鲜注入力量。c.联合技术应用研究。几种保鲜手段并进或是复合保鲜剂应用以达到协同增效的目的。比如新型生物保鲜剂、低温及新型包装等技术联合并用,发挥各自优势,以最低效能达到最佳保鲜效果。d.强化全程动态管控。从生长期到采前管控再到采后贮藏运输销售等环节,环环相扣,形成较为系统、成熟可供推广的技术集成,全面提升香菇品质和安全。

此外,随着物联网和物流行业的发展,未来香菇保鲜技术应具备抵抗外界环境变化的能力以及满足人们对香菇及其制品追根溯源的要求,使香菇保鲜技术向着智能化、信息化的方向发展,在满足营养风味及货架期的同时实现更多的社会化功能。

参考文献

[1] TANG C, HOO P C, TAN L T, et al. Golden needle mushroom: A culinary medicine with evidenced-based biological activities and health promoting properties[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2016, 7(474): 1-27.

[2] 史君彦,高丽朴,王清,等.食用菌保鲜技术的研究进展[J]. *食品工业*, 2017, 38(6): 278-282. [SHI J Y, GAO L P, WANG Q, et al. The latest research advances in preservation technology of edible fungi[J]. *The Food Industry*, 2017, 38(6): 278-282.]

[3] 陈慧斌,王梅英.食用菌保鲜技术研究进展[J]. *宁德师专学报(自然科学版)*, 2008, 20(1): 14-17. [CHEN H B, GAO L P, WANG Q, et al. Research progress on preservation technology of edible mushroom[J]. *Journal of Ningde Teachers College(Natural Science)*, 2008, 20(1): 14-17.]

[4] 张爱莉,卢作焜,张良等.香菇的保鲜与加工工艺研究进展[J]. *食品工业*, 2021, 42(11): 259-263. [ZHANG A L, LU Z K, ZHANG L, et al. Research progress on fresh-keeping and processing technology of *Lentinula edodes*[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(11): 259-263.]

[5] 陈冰洁,乔勇进,张国强,等.香菇采后保鲜技术研究进展[J]. *食用菌学报*, 2019, 26(3): 141-147. [CHEN B J, QIAO Y J, ZHANG G Q, DONG Z Z, et al. Research progress on postharvest preservation technology of *Lentinus edodes*[J]. *Edible Fungi of China*, 2019, 26(3): 141-147.]

[6] 刘芹,孔维威,孔维丽,等.食用菌采后劣变机理及调控技术研究进展[J]. *食用菌*, 2019, 41(5): 1-6. [LIU Q, KONG W W, KONG W L, et al. Research progress on postharvest deterioration mechanism and control technology of edible fungi[J]. *Edible Fungi*, 2019, 41(5): 1-6.]

[7] 乔勇进,张娜娜,戚文元等.食用菌采后生理及保鲜技术与展望[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(6): 145-149. [QIAO Y J, ZHANG N N, QI W Y, et al. Research and prospects of the post-harvest physiology and fresh-keeping techniques of edible fungi[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 2015, 31(6): 145-149.]

[8] 钱磊,刘连强,李凤美,等.食用菌生物保鲜技术研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(1): 226-231. [QIAN L, LIU L Q, LI F M, et al. Research progress on biological preservation technology of edible mushroom[J]. *Storage and Process*, 2020, 20(1): 226-231.]

[9] 王艳红,刘斌.影响果蔬采后失水若干因素的分析[J]. *保鲜与加工*, 2009, 9(5): 4-8. [WANG Y H, LIU B. Analysis on several factors influencing post-harvest dehydration of fruit and vegetable[J]. *Preservation and Processing*, 2009, 9(5): 4-8.]

[10] PAUDEL E, BOOM R M, SICCAMA J, et al. Effects of cellular structure and cell wall components on water holding capacity of mushrooms[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 187: 106-113.

[11] 王文辉,徐步前.果品采后处理与贮运保鲜[M].北京:金盾出版社,2003: 10. [WANG W H, XU B Q. Postharvest treatment and storage and transportation of fruits[M]. Beijing: Jindun Press, 2003: 10.]

[12] 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. [WU Y D. Effects of dehydration treatment on quality and flavour of *Lentinus edodes* during post-harvest storage [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.]

[13] 戚向阳,周婷婷,曹少谦.不同强度脉冲强光对鲜香菇保鲜效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 287-293. [QI X Y, ZHOU T T, CAO S Q. Effects of intense pulsed light treatment with different intensity on preservation of fresh shiitake mushrooms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(3): 287-293.]

[14] 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 capacity of *Lentinus edodes* in two harvest periods[J]. Chinese Journal of Food Science, 2018, 18(4): 228–234.]
- [15] 李静,任心如,卢雅琪,等. γ -氨基丁酸对香菇采后品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 301–306. [LI J, REN X R, LU Y Q, et al. Effect of γ -aminobutyric acid on postharvest quality of *Lentinus edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 301–306.]
- [16] 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. [XU X L, LIU J, DENG B, et al. Effect of sortwave ultraviolet treatment on browning of postharvest *Lentinula edodes*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(5): 1129–1135.]
- [17] 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. [TAO L, SHEN K, LIU T Z, et al. Effect of haw pectin oligosaccharide on the preservation of shiitake mushrooms[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(7): 226–230.]
- [18] 黄欣莉,韩廷超,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. [HUANG X L, HAN Y C, CHNE H J, et al. 1-MCP inhibits postharvest browning of *Lentinus edodes* by regulating energy metabolism[J]. Food Science, 2022, 43(13): 192–198.]
- [19] QUEVEDO R, DÍAZ 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.
- [20] 张红娟,李劼,唐丽丽,等. 采后贮藏温度及气体成分对鲜香菇品质的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(9): 1540–1544. [ZHANG H J, LI J, TAGN L L, et al. Effects of post harvest storage temperature and gas composition on the quality of fresh Shiitake mushroom[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(9): 1540–1544.]
- [21] 张玉笑,马阳历,郭衍银,等. O_2/CO_2 自发气调对香菇保鲜效果的影响[J]. 中国果菜, 2020, 40(11): 12–20. [ZHANG Y X, MA Y L, GUO Y Y, et al. Effects of O_2/CO_2 active modified atmosphere packaging on storage quality of Shiitake mushroom[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(11): 12–20.]
- [22] 苏安祥,浦浩亮,胡秋辉,等. 脱水香菇不同贮藏水分活度下细菌菌落演替规律及关键菌控制[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 221–228. [SU A X, PU H L, HU Q H, et al. Bacterial community succession in dehydrated *Lentinus edodes* stored at different water activities and control of key harmful bacteria[J]. Food Science, 2021, 42(23): 221–228.]
- [23] 袁鹏宇,崔凤仙,周国平,等. 可栽培食用菌子实体发育相关的调控基因研究进展[J]. 中国食用菌, 2020, 39(2): 1–6, 21. [YAUN P Y, CUI F X, ZHOU G P, et al. Research progression on regulatory gene related to the development of fruiting bodies of cultivable edible fungi[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(2): 1–6, 21.]
- [24] Sakamoto YC, Nakade KK, Sato TS. Characterization of the post-harvest changes in gene transcription in the gill of the *Lentinula edodes* fruiting body[J]. Curr Genet, 2009, 55: 409–423.
- [25] XU L, FANG X, WU W, et al. Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried Shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*)[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 406–413.
- [26] 赵爽,苏哲,谷彤彤,等. 鲜切香菇贮藏过程中质构变化与自溶自噬分析[J]. 生物技术通报, 2020, 36(5): 176–182. [ZHAO S, SU Z, GU T T, et al. Analysis of fresh-cut shiitake(*Lentinula edodes*) and autolysis during storage[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(5): 176–182.]
- [27] 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.]
- [28] 孟令伟,张芳,胡亚光. 储藏温度及保鲜包装薄膜对香菇品质的影响[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 31–35. [MEGN L W, ZHANG F, HU Y G. Effects of storage temperature and packaging films on the quality of shiitake mushroom[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 31–35.]
- [29] TANO K, ARUL J, DOYON G, et al. Atmospheric composition and quality of fresh mushrooms in modified atmosphere packages as affected by storage temperature abuse[J]. Journal of Science, 1999, 64(6): 1033–1077.
- [30] 孙宏波,林崇实,姜延舟. 香菇真空冷冻干燥工艺的研究[J]. 中国食用菌, 1997, 17(1): 39–40. [SUN H B, LIN C S, JIANG Y Z. Study on vacuum freeze-drying technology of *Lentinus edodes*[J]. Edible Fungi of China, 1997, 17(1): 39–40.]
- [31] ARES G, PARENTELLI C, GAMBARO A, et al. Sensory shelf life of shiitake mushrooms stored under passive modified atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(2): 191–197.
- [32] 何家鹏,何其,董浩,等. 自发式气调共混膜的制备及性能分析[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4799–4805. [HE J P, HE Q, DONG H, et al. Preparation and performance analysis of modified atmosphere blending membrane[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(12): 4799–4805.]
- [33] FARBER J, HARRIS L, PARISH M, et al. Microbiological safety of controlled and modified atmosphere packaging of fresh and fresh-cut produce[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2003, 2(Supplement s1): 142–160.
- [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, WAGN 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] 董同力嘎,张靳,胡健,等. 硅橡胶材料、生物可降解材料和微孔材料在果蔬气调保鲜中的应用与进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 96–100. [DONG T L G, ZHANG X, HU J, et al. Application and research progress of silicone rubber, biodegradable and material and microporous material in modified atmosphere packaging of fruits and vegetables[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2020, 41(6): 96–100.]
- [36] 张晨,杨诗奇,李超,等. 气调包装与其他技术结合在食品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 287–290. [ZHANG

- C, YANG S Q, LI C, et al. Research progress of modified atmosphere packaging technology in food preservation[J]. The Food Industry, 2020, 41(5): 287-290.]
- [37] 于珂, 李文香. 不同通透性保鲜膜对香菇保鲜效果的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(11): 142-145. [YU K, LI W X. Effects of different permeability films on fresh-keeping of *Lentinus edodes*[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(11): 142-145.]
- [38] 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, 16(38): 225-228. [ZENG L P, FAN A P, YANG T H, et al. The preservation effect of polylactic acid nano-TiO₂ composite film packaging on *Lentinus edodes*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 16(38): 225-228.]
- [39] 李斌, 杨秦, 肖洪, 等. 辐照对食品品质的影响及辐照食品的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 4-6. [LI B, YAGN Q, XIAO J, et al. Research progress on the effects of irradiation on food quality and irradiated food[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(4): 4-6.]
- [40] 叶爽, 陈璵, 高虹, 等. γ 射线辐照对香菇采后贮藏过程中水分特性及理化指标的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 91-97. [YE S, CHEN K, GAO H, et al. Effect of Gamma irradiation on water properties and physicochemical indexes of *Lentinus edodes* during postharvest storage[J]. Food Science, 2021, 42(17): 91-97.]
- [41] 周冉冉, 高虹, 范秀芝, 等. ⁶⁰Co- γ 射线和电子束辐照对鲜香菇保鲜效果的初步研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 490-497. [ZHOU R R, GAO H, FAN X Z, et al. Preliminary study on the effects of ⁶⁰Co- γ -ray irradiation and electron beam irradiation on fresh *Lentinus edodes*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(3): 490-497.]
- [42] 王贺. 冷杀菌技术在食品加工中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(11): 129. [WANG H. Application of cold sterilization technology in food processing[J]. China New Technologies and Products, 2012(11): 129.]
- [43] 杨晋恒, 邵海燕, 周拥军, 等. 臭氧处理对香菇采后品质与生理的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1201-1207. [YAGN J H, GAO H Y, ZHOU Y J, et al. Effect of ozone treatment on postharvest quality and physiology indexes of shiitake mushroom[J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2017, 29(7): 1201-1207.]
- [44] MAI T T T, MOHAMMED F. Ultraviolet treatment of orange juice[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004(5): 495-502.
- [45] LEIPOLD M, LAROUCSI F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plas -mas at atmospheric pressure[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2004, 233: 81-86.
- [46] 姜积康, 王宗伟, 李文香, 等. 短波紫外线处理对香菇采后保鲜效果的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 286-291. [JIANG J K, WAGN Z W, LI W X, et al. Effect of short-wave ultraviolet treatment on postharvest preservation of *Lentinus edodes*[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2019, 36(4): 286-291.]
- [47] 郑瑞生, 王则金. 食品冷杀菌技术的研究综述[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 80-87. [ZHENG R S, WANG Z J. Review on cold sterilization technology of food[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(3): 80-87.]
- [48] 张春翠. 食用菌物流保鲜现状分析[J]. 中国食用菌, 2020, 39(1): 122-123, 127. [ZHANG C C. Analysis on the fresh-keeping status of edible fungi logistics[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(1): 122-123, 127.]
- [49] 姜天甲. 主要食用菌采后品质劣变机理及调控技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. [JIANG T J. Study on the mechanism and regulation of quality deterioration of main edible fungi after harvest [D] Hangzhou: Zhejiang University, 2011.]
- [50] 何雨婷, 郭艳明, 张林玉, 等. 低功率微波处理对香菇采后生理及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 338-341. [HE Y T, GUO Y M, ZHAGN Y L. et al. Effects of low power microwave treatment on physiological and quality of postharvest mushrooms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(10): 338-341.]
- [51] 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. [LI Y J, GUO Y X, DING S D, et al. Effect of 1-MCP and chitosan treatments on postharvest storage quality, enzyme activities and antioxidant activities of shiitake mushrooms(*Lentinus edodes*)[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(11): 38-44.]
- [52] 王妍彦, 张流波. 二氧化氯气体对物体表面消毒效果及其影响因素研究[J]. 中国消毒学杂志, 2018, 35(6): 401-403. [WANG Y Y, ZHANG L B. Study on the disinfection effect and influence factors of chlorine dioxide gas to object surface[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2018, 35(6): 401-403.]
- [53] 韩春然, 闫宝军, 李强, 等. 化学法保鲜香菇的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 382-384. [HAN C R, YAN B J, LI Q, et al. Study on the preservation of mushrooms by chemical methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(24): 382-384.]
- [54] 黄赫雁. 香菇复合保鲜技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2017. [HUANG H Y. Study on compound preservation technology of *Lentinus edodes* [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2017.]
- [55] 王瑞清, 刘媛媛, 严俊杰, 等. L-半胱氨酸对香菇贮藏过程中内源性甲醛的转化及子实体品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5177-5182. [WANG R Q, LIU Y Y, YAN J J, et al. Effect of L-cysteine on transformation of endogenous formaldehyde and quality of fruiting body in *Lentinus edodes* during storage[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(13): 5177-5182.]
- [56] 刘开华, 邢淑婕. 壳聚糖中添加茶多酚对香菇贮藏品质的影响[J]. 食用菌学报, 2012, 19(3): 54-58. [LIU K H, XING S J. Effect of adding tea polyphenol into chitosan on storage quality of *Lentinus edodes*[J]. Journal of Edible Fungi, 2012, 19(3): 54-58.]
- [57] JIANG T, FENG L. Effect of chitosan coating enriched with thyme oil on postharvest quality and shelf life of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1): 188-196.]

- [58] JIANG T, FENG L, ZHENG X, et al. Physicochemical responses and microbial characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) to gumarabic coating enriched with natamycin during storage[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 1992-1997.
- [59] 赵梅, 刘园园. 大蒜提取液对香菇保鲜效果的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(12): 216-218. [ZHAO M, LIU Y Y. Effect of garlic extract on fresh keeping effect of *Lentinus edodes* [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(12): 216-218.]
- [60] WENXL, ZHANGW, ZHOU QL, et al. Effect of cinnamaldehyde fumigation treatments on post-harvest physiology and quality of shiitake mushroom[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(8): 190-196.
- [61] XUE Z, HAO J, YU W, 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, 2016, 40(3): 1-7.
- [62] 俞益芹, 张焕新. 蜂胶复合保鲜剂对双孢蘑菇保鲜的效果[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 445-448. [YU Y Q, ZHANG H X. Effect of compound fresh-keeping agents with propolis on *Agaricus bisporus* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(6): 445-448.]
- [63] 高凯丽, 胡文忠, 刘程惠, 等. 天然保鲜剂在采后浆果保鲜中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 320-324. [GAO Kaili, HU Wenzhong, LIU Chenghui, et al. Research progress of natural preservatives on postharvest berry preservation [J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(24): 320-324.]
- [64] YOUSUF B, QADRI OS, SRIBASTAVA AK. Recent developments in shelf-life extension of fresh-cut fruits and vegetables by application of different edible coatings: A review[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 198-209.
- [65] 肖玮, 孙智慧, 刘洋, 等. 果蔬涂膜保鲜包装材料及技术研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 7-12. [XIAO W, SUN Z H, LIU Y, et al. Application research progress of fresh-keeping packaging material and technology of fruit and vegetable film[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 7-12.]
- [66] 高帅平, 魏书信, 王安建, 等. 两种气调保鲜方式对香菇贮藏品质及生理生化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 276-281. [GAO S P, WEI S X, WANG A J, et al. Effects of two kinds of modified atmosphere preservation methods on storage quality and physiological and biochemical properties of *Lentinus edodes* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 276-281.]
- [67] 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.]
- [68] JIANG TJ, FENG LF, WANG Y B. Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom(*Lentinus edodes*) during cold storage[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 954-960.