

食用菌采后品质变化及物理保鲜技术研究进展

杨永佳, 孔芃, 景赛, 朱璧合, 王彩莲, 侯德华, 寇莉萍*

(西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 咸阳 712100)

摘要: **目的** 综述国内外不同物理技术在食用菌保鲜上的研究进展, 为进一步提升鲜食食用菌品质及延长其贮藏期提供参考。**方法** 结合食用菌在贮藏期内出现的品质劣变现象, 如褐变软化、水分流失及营养物质消耗等, 总结物理保鲜技术(如低温保鲜、气调技术、辐照技术、光照技术、电磁技术等)在食用菌采后的应用, 分析不同物理保鲜方法的保鲜机制及应用效果。**结论** 物理技术可减缓食用菌采后劣变的进程, 保持食用菌的新鲜品质, 延长其货架期, 将在食用菌保鲜上发挥更大的作用。不同的保鲜方式适用于一定的场景, 在实际生产中应结合食用菌的特性、操作条件、经济效应, 选择适宜的保鲜方式。

关键词: 食用菌; 品质劣变; 物理保鲜; 贮藏

中图分类号: TS255.36 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)01-0139-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.016

Progress in Postharvest Quality Change and Physical Preservation Technologies of Edible Fungi

YANG Yongjia, KONG Peng, JING Sai, ZHU Bihe, WANG Cailian, HOU Dehua, KOU Liping*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Shaanxi Xianyang 712100, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research progress of different physical technologies in China and abroad in the preservation of edible fungi, so as to provide reference for further improving the quality of fresh edible fungi and prolonging their storage period. According to the quality deterioration of edible fungi during storage, including browning and softening, water loss, and nutrient consumption, the application of physical preservation technology, such as low temperature preservation, atmosphere packaging technology, irradiation technology, light technology, and electromagnetic technology in edible fungi after harvest was summarized. The preservation mechanism and application effect of different physical preservation technologies were also discussed. Physical technology will play a larger role in the preservation of edible fungus because it can delay the deterioration of edible fungi after harvest, retain the fresh quality of edible fungi and extend their shelf life. Different preservation technologies are useful in different situations, and the best preservation technology should be chosen based on the properties of edible fungi, operational circumstances, and financial implications in the real production.

KEY WORDS: edible fungi; quality deterioration; physical preservation; storage

食用菌具有高蛋白、高膳食纤维、低脂肪、低热量的特点, 是公认的良好营养来源和健康食品^[1]。我国食用菌的产量丰富, 2021年食用菌产量超4 000万t,

占世界产量的75%以上, 主要品种有香菇、平菇、杏鲍菇、金针菇等^[2-3]。由于食用菌新陈代谢旺盛, 且采后运输跨度大, 因此其贮藏保鲜不易, 易出现腐败

收稿日期: 2023-07-03

基金项目: 陕西省重点研发计划(2023-ZDLNY-15)

*通信作者

变质,在常温下仅能保存2~4 d,制约了食用菌的产业发展^[4]。由此可见,采用适宜的保鲜手段抑制食用菌的生理活动、保持其新鲜品质、延长其货架期具有非常重要的现实意义。食用菌的保鲜方法包括化学保鲜、物理保鲜及生物保鲜等。其中,化学保鲜能够短时间达到良好的保鲜效果,但伴随着化学残留的风险^[5];生物保鲜具有绿色、天然等优点,但往往难以满足大规模生产的需求^[6];物理保鲜也存在一些问题,如能耗较高、设备成本昂贵,但它具有无化学残留、对营养成分破坏小等特性,使其成为主要的食用菌保鲜方式^[7]。文中从食用菌采后品质劣变现象及其原因出发,归纳目前用于食用菌保鲜的物理方法,并分析各物理方法的优缺点及适用性,并对物理保鲜技术的发展方向进行展望,以期对食用菌采后保鲜提供参考,更好地促进我国食用菌产业的发展。

1 食用菌采后品质变化

食用菌具有水分含量高、呼吸率高、水平酶活性高、表面缺乏保护结构等特点,在贮运过程中易发生失水皱缩、褐变软化等品质劣变现象^[3]。呼吸速率的增高、对酶促褐变的敏感性增强及微生物侵染的易发性是食用菌采后品质劣变和货架期缩短的主要原因^[8]。食用菌采后品质劣变与其呼吸代谢、能量代谢和活性氧代谢之间关系密切,其中呼吸作用和能量代谢均会产生具有细胞毒性作用的活性氧,这些活性氧分子会对细胞造成氧化损伤,进一步促进其品质的劣变^[9-10]。

1.1 感官品质下降

1.1.1 色泽

颜色是影响消费者购买行为的最直观因素。褐变是食用菌采后品质劣变的普遍现象,菇体边缘的褐变程度通常比其他部位更严重,特别是对杏鲍菇、双孢菇等白色菇类商品价值的影响较大。食用菌褐变有酶促褐变和非酶促褐变,主要由酚类化合物参与的酶促褐变所致^[11]。此外,微生物的入侵也是造成食用菌褐变的一大因素,如食用菌中优势微生物假单胞菌分泌的细菌毒素不仅会破坏细胞膜,还会参与变色反应^[12]。

1.1.2 质构

采后食用菌的质构变化表现为硬度下降、韧度增加。食用菌的木质化和软化腐烂由自身生理代谢、外部机械损伤及微生物侵染等多种因素所致。食用菌不断进行呼吸作用,消耗了自身的有机物,使其逐步衰老软化^[13]。子实体经机械损伤后会触发自噬自溶的应激生理反应,导致细胞壁断裂、细胞膜消融^[14]。同时,暴露于环境中的组织易感染致腐菌,加速软化发生。韧性增加是由木质素积累所致,表现为菇体呈海绵状、脆度降低,主要发生在菌柄部位^[15]。

1.1.3 风味

风味是评判食用菌品质的重要指标之一。食用菌的风味成分复杂,由多种化合物共同作用产生,其风味与核苷酸代谢、脂肪酸代谢、氨基酸代谢及美拉德反应有关^[16]。挥发性物质(如八碳化合物和含硫化合物)是产生食用菌特征性香味的关键物质,非挥发性物质(如呈味核苷酸、呈味肽等)主要影响滋味的形成^[17-18]。食用菌的风味受到产地、成熟度、加工方式、贮藏条件的影响,出现异味通常表示其品质下降^[19]。

1.2 水分流失

水分是影响食用菌风味和口感的关键因素,其含量是判断食用菌新鲜度的重要依据,当食用菌的失水量达到自身质量的5%时,表示已失去商品价值^[5]。食用菌采后水分的流失主要由呼吸作用、蒸腾作用及机械损伤所致。失水过多不仅会使子实体表面褶皱、卷曲、开裂,还会使其风味和质量发生变化,导致商品价值下降^[20]。

1.3 营养物质消耗

食用菌在采后无法从环境中获取养分,只得不断消耗营养物质(如多糖、蛋白质、氨基酸、脂类等)和水分,以维持自身代谢所需能量^[21]。菌褶部分消耗了大部分的营养物质,而碳水化合物的消耗会使菇体发生质量损失。在贮藏过程中,细胞壁多糖含量的下降致使食用菌发生软化。此外,部分蛋白质降解后的游离氨基酸被氧化成醛类物质,也会造成褐变,即食用菌的多种劣变进程是相互关联的^[22]。

2 物理保鲜技术

2.1 低温保鲜

低温保鲜包括冷藏保鲜、速冻保鲜和冷冻干燥保鲜等。冷藏是常见的贮藏和保鲜食用菌的方式,能有效抑制菌盖开伞和菌柄伸长,降低呼吸作用。大部分食用菌适宜的贮藏温度为0~5℃,草菇类高温型食用菌除外,在贮藏温度低于10℃时草菇会发生软化、腐烂等冷害现象^[23]。冷藏保鲜是一种简单易行的保鲜方式,但单纯冷藏往往只能在短时间内保持其新鲜品质,实际应用中常将冷藏作为基础保鲜手段,并与气调技术、辐照技术等联合使用,从而对食用菌进行保鲜。

速冻保鲜是将食用菌快速降温至冰点以下,以抑制酶活性和微生物的生长。何政宇等^[24]发现-60℃静止空气冻结可有效降低杏鲍菇的汁液流失率,保持杏鲍菇的品质。冷冻干燥是将食用菌在低温下进行预冻,然后在真空环境下进行干燥处理,能最大限度地保持食用菌的营养品质和感官品质。经真空冷冻干燥

后,猴头菇的可溶性糖、游离氨基酸等含量能得到有效保留,从而维持了原有风味^[25]。速冻保鲜和冷冻干燥保鲜可用于食用菌的长期贮藏,但速冻后食品的水分会析出,且冷冻干燥的成本和能耗较高,这也是不可忽视的问题。

2.2 气调保鲜

气调保鲜是在冷藏的基础上通过改变包装内气体成分的比例,以抑制其生理代谢活动,减少营养物质的消耗,它是农产品规模化保鲜的主要方法之一。气调技术包括主动气调技术和自发气调技术,主动气调技术是根据需要,人为地充入氮气、二氧化碳、氧气、氩气^[26]等,以置换出包装内的空气。多数研究认为,高浓度 CO_2 和低浓度 O_2 的气体环境能抑制食用菌的生理代谢。如张沙沙等^[27]研究发现,气调贮藏(体积分数为 6%的 O_2 和 10%的 CO_2)延缓了兰茂牛肝菌呼吸峰的出现,保持了较低的超氧化物歧化酶活性及多酚氧化酶活性。也有研究发现,高浓度的氧气环境(O_2 的体积分数 $\geq 50\%$)能抑制食用菌呼吸速率,并减少食用菌膜脂氧化程度,增加酚类物质,从而增大抗氧化性^[28-29]。自发气调是利用果蔬自身的呼吸作用和保鲜袋的透气性形成动态的平衡气体环境^[30]。李萍等^[31]采用 3 种包装袋对羊肚菌进行贮藏,研究发现,采用微孔包装后羊肚菌的可溶性固形物和多酚含量维持在较高水平。气调库在生产中已广泛使用,并发挥着实际效用,但还需进一步探究不同品种食用菌适宜的贮藏温度、湿度和气体成分。随着气调保鲜技术和材料的发展,基于纳米材料、生物活性成分和可生物降解的复合包装越来越受到关注^[32-33]。

2.3 辐照保鲜

2.3.1 γ 射线

γ 辐射具有很强的穿透力,在食品中常利用钴 60 释放的高能量 γ 射线破坏微生物的核糖核酸和蛋白质,进行杀菌消毒。Akram 等^[34]研究发现,采用 1.0 kGy γ 射线处理能延缓杏鲍菇颜色、质量的下降,采用 3.0 kGy γ 射线处理则会导致杏鲍菇色泽、质地发生有害变化。Shi 等^[20]研究了 γ 射线处理后香菇在冷藏 20 d 后含水量的变化情况,结果表明,采用 1.0 kGy 辐照处理后香菇表现出保留水分的能力,而采用 2.0 kGy 辐照处理会引起水样渗出和菌盖萎蔫。

2.3.2 电子束

电子束辐照保鲜技术通过电子加速器产生的电子束射线破坏微生物的 DNA、细胞膜结构,使其正常生理功能丧失。一般认为,电子束辐照产生的过量活性氧会造成核苷酸、蛋白质等大分子发生氧化损伤,但经适宜的辐照剂量处理后,低浓度活性氧可激活防御系统,保持果蔬采后的抗氧化特性^[35]。张玉等^[36]采用电子束辐照对鲜香菇的抗氧化能力进行了

研究,发现采用 2.0 kGy 辐照剂量能减少丙二醛的积累,在贮藏末期其含量比未辐照组低 23.94%。还有研究发现,采用 0.6~0.9 kGy 电子束处理可将滑菇的贮藏期延长 3~5 d^[37]。

2.3.3 X 射线

X 射线由高能电子束轰击重金属时突然减速时产生,其发射的光子具有连续、广泛的能谱。Dong 等^[38]研究发现,采用 X 射线处理对双孢菇的贮藏品质和抗氧化能力有着积极作用,在贮藏结束时 1.0 kGy 处理组的硬度比未处理组的硬度高出 43.68%,推测 X 射线延缓双孢菇的褐变是通过抑制细胞膜通透性的增加和丙二醛的积累,提高超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性实现的,表明 X 射线处理是一种有效的双孢菇保鲜物理方法。

近年来,辐照技术在食用菌保鲜上的处理条件、贮藏期及保鲜效果如表 1 所示,可以看到,辐照处理能有效抑制微生物的繁殖,并保持食用菌的新鲜品质。辐照处理除了能降低食用菌的微生物负载、延长其贮藏期外,还是一种有效降低食品致敏性的安全手段^[42]。目前,在食用菌上用于保鲜的辐射源主要有 γ 射线、电子束、X 射线。不同种类的食用菌种类,其适宜保鲜的辐照剂量存在差异,采用不适宜的剂量反而会对食用菌的营养物质和感官品质产生不利影响^[43]。在实际生产中, γ 射线的辐照效果显著,但存在一定操作危险性,不适于规模化生产。与 γ 射线辐照相比,采用电子束辐照具有加工时间短、加工流程简单、辐照过程更易启停等特点,适于产业化和规模化生产^[36]。针对 X 射线的研究集中在抑制食源性致病菌上,它在果蔬中的应用不及 γ 射线和电子束广泛。辐照在食品上多用于香料、肉制品等高附加值原料的杀虫灭菌上,在农产品保鲜的研究正在逐步探索中^[44]。

2.4 光照保鲜

2.4.1 紫外线

紫外线(Ultraviolet, UV)是波长为 10~400 nm 的电磁波辐射。短波紫外光能穿透微生物的细胞膜,引起 DNA 断链、蛋白质合成受阻,导致微生物死亡。许小璐等^[45]研究发现,采用 4 kJ/m² UV-C 处理,可将与褐变相关酶(如过氧化物酶、超氧化物歧化酶)的活性维持在较高水平,并延缓总酚、可溶性蛋白含量的下降,从而抑制香菇的褐变。不仅可以紫外线照射作为一种保鲜手段,还可作为增加食用菌中维生素 D 含量的一种营养强化方式。如蔡继业等^[46]采用 0.203 mW/cm² 中波紫外线照射香菇 2 h,将香菇的维生素 D₂ 含量从 0 $\mu\text{g/g}$ 升至 104.87 $\mu\text{g/g}$,且在贮藏过程中香菇的表观形态、抗氧化活性都较稳定。紫外光在果蔬保鲜上的应用较早,技术成熟且环保节能,但紫外光无法杀灭已经侵入果蔬内部的细菌和真菌。

表 1 辐照技术在食用菌保鲜中的应用效果
Tab.1 Effect of irradiation method on edible fungus preservation

保鲜方式	食用菌	处理条件	贮藏时间/d	保鲜效果	参考文献
γ 射线	杏鲍菇	5 °C, 聚氯乙烯薄膜, 剂量为 1、2、3 kGy	30	1.0 kGy 辐照处理组保持良好的外观、 L^* 、质量、微观结构	[34]
γ 射线	香菇	4 °C, 25 μm 聚乙烯薄膜, 剂量为 1、2 kGy	20	1.0 kGy 处理有效降低了酶活性、呼吸作用, 减少了微生物侵染。	[20]
γ 射线+超声	香菇	4 °C, 25 μm 聚乙烯薄膜, 40 kHz, 300 W, 10 min, 剂量为 1 kGy	20	γ 射线与超声的协同处理减少了香菇中假单胞菌和大肠杆菌的数量, 增加了总酚含量	[39]
γ 射线+Ag 纳米	双孢蘑菇	4 °C, 聚乙烯薄膜, 剂量为 1、2 kGy	21	联合处理有效减少了金黄色葡萄球菌、大肠杆菌数量, 并保持了色泽和硬度	[40]
电子束	香菇	4 °C, 剂量为 1、2、3 kGy	16	2.0 kGy 辐照延缓了香菇的褐变、总酚含量的下降	[36]
电子束	双孢蘑菇	4 °C, 聚氯乙烯薄膜, 剂量为 0.5、1、2、4 kGy	16	2.0 kGy 辐照处理保持了较高的 L^* 、总酚含量, 细胞膜渗透率较低	[41]
电子束	滑菇	常温, 聚乙烯薄膜, 剂量为 0.3、0.6、0.9、1.2 kGy	10	0.6~0.9 kGy 辐照处理有效抑制了腐败与开伞	[37]
X 射线	双孢蘑菇	4 °C, 聚乙烯薄膜, 剂量为 0.5、1、1.5、2 kGy	21	1.0 kGy 辐照抑制了假单胞菌增殖、膜透性增加和 MDA 积累	[38]

2.4.2 发光二极管

发光二极管 (Lighting Emitting Diode, LED) 是一种将电能直接转化为光能的半导体发光元件。目前, 针对 LED 的抑菌机制尚无明确定论。有研究认为, LED 致死微生物的机制主要是 LED 照射激活了微生物的内源性光敏分子(细胞色素、黄素、卟啉等), 产生了活性氧。活性氧会损害细胞膜, 导致细胞内的成分泄漏。活性氧还能直接灭活酶、损伤蛋白质, 导致微生物死亡^[47]。LED 的杀菌效果与波长、照射剂量、产品表面特性有关, 其中红光和蓝光在果蔬保鲜中应用较多。朱凯等^[48]研究表明, 联合中短波紫外和 LED 蓝光可有效维持鲜切杏鲍菇的色泽、可溶性糖含量, 并抑制细胞膜、细胞壁的降解。相较于传统光源 (高压钠灯、金属卤化物灯等), 发光二极管技术具有光谱杀菌、操作简便、寿命长的优点^[49], 但 LED 保鲜所需的时间较长。针对不同类型的食用菌, 还需要进一步探索最佳的 LED 光照参数和处理时间。

2.4.3 脉冲强光

脉冲强光 (Intense Pulsed Light, IPL) 是由动力单元和氙灯单元组成的脉冲系统发射的瞬时且高强度的脉冲光能量, 会产生光热反应、光化反应或光物理作用, 可直接作用于微生物, 达到杀菌的目的。Oms-Oliu 等^[50]研究发现, 采用低通量 (4.8 J/cm²) 脉冲光处理蘑菇片, 在保持颜色、营养物质的含量等方面表现较好, 但 12、28 J/cm² 的脉冲光会引起热损伤, 导致褐变。IPL 处理还能延缓双孢蘑菇的开伞、褐变及膜脂氧化, 减缓维生素 C 和总酚含量的下降^[51]。采用

IPL 技术杀灭果蔬、肉制品、食品包装材料表面的微生物的效果显著, 但其作用机理较复杂, 对作用条件的要求较严格^[52]。

2.5 超高压保鲜

超高压保鲜技术采用 100 MPa 以上的超高静水压处理, 以达到钝化酶、杀菌保鲜的效果。与传统的热力高压灭菌相比, 超高压能保持食用菌的鲜度, 且对营养物质、组织结构的破坏较小, 符合未来食品加工的要求。超高压技术常用于果蔬汁的杀菌, 在食用菌中应用较多的是干燥和生物活性成分提取^[53]。还有一些研究指出, 杏鲍菇在 200 MPa 下保压 9 min 后, 能保持较好的硬度和色泽, 有效延缓其劣变进程^[54]。然而, 超高压处理会在一定程度上引起细胞膨压的下降, 甚至破坏细胞膜结构, 从而导致硬度下降^[55]。

2.6 减压保鲜

减压保鲜技术是在气调保鲜技术上发展起来的, 通过减压设备制造低压、低氧的气体环境, 同时经压力调节器进行连续换气, 维持压力的动态恒定。减压保鲜通过降低环境中氧的含量, 促进食用菌中挥发性气体向外扩散, 减弱食用菌的呼吸作用, 减少生理病害的发生^[56]。有研究发现, 采用 25.3 kPa 和 50.7 kPa 减压处理可延缓杏鲍菇色泽、硬度、可溶性固形物等品质指标的下降^[13]。减压处理还能作为一种逆境胁迫, 提高食用菌自身的抗性。孙倩倩^[21]研究表明, 减压处理可抑制双孢蘑菇的呼吸速率、膜透性、丙二醛含量和超氧阴离子生成速率的上升。虽然减压保鲜可减少果蔬的污染和病害, 但因罐体容器的成本较高、

罐体材料的耐压性不足、技术不成熟, 阻碍了此项技术的推广。

2.7 超声波保鲜

超声波指频率大于 16 Hz 的机械振动产生的声波, 其灭菌机制主要依赖于空化作用^[57]。空化作用即超声波在液体介质中产生大量微小气泡, 随着超声波的传播, 气泡逐渐变大, 直至临界状态而崩溃破裂, 局部产生高温高压, 从而破坏微生物。超声技术常应用于果蔬采后的清洗、杀菌、保鲜中, 具有安全高效的优点。胡宇欣等^[58]研究发现, 超声能通过影响磷酸戊糖的代谢来提高抗氧化能力, 改善鹿茸菇的贮藏品质。Zan 等^[57]研究发现, 采用超声波处理 (40 kHz、300 W) 能有效维持草菇的感官品质和线粒体完整性。单独采用超声处理的效果欠佳, 常将超声与其他方式 (如乳酸钙) 联用, 以保持食用菌的品质^[59]。

2.8 电磁场保鲜

2.8.1 低温等离子体保鲜

低温等离子体 (Cold Plasma, CP) 是由激发源产生的一种气体电离现象, 被称为继固、液、气后物质存在的第 4 态。当等离子体接触食品表面时, 会形成强氧化性的多种活性含氧基团, 这些高活性物质对微生物的 DNA 和细胞膜具有强烈的氧化作用^[60]。Pourbagher 等^[61]对双孢蘑菇进行了介质阻挡放电等离子体处理, 在贮藏 21 d 后, 蘑菇的颜色、硬度、抗氧化能力保持较好, 微生物数量为未处理组的 1/3。包装内等离子体处理即在装有食品的包装内部产生等离子体, 在杀菌的同时消除处理后污染的可能。Subrahmanyam 等^[60]研究发现, 采用包装内高氧 (体积分数为 80%) 等离子体处理后, 双孢菇多酚氧化酶的活性降低了 29%, 且其菌落总数相较于未处理组的菌落总数减少了 1.14 lg(CFU/g)。近年来, CP 技术在食品保鲜方面显示出新的应用前景, 但关于 CP 处理过程中是否形成有毒化合物的研究有限, 其处理后食品的安全性尚未得到广泛验证。

2.8.2 高压电场保鲜

高压电场保鲜技术是一种非热加工技术, 在外加电场下可改变微生物膜电位, 释放活性氧分子, 从而对食品进行杀菌保鲜^[62]。Yan 等^[63]研究发现, 高压电场延缓了双孢蘑菇白度、硬度和总酚的下降, 并发现高压电场是通过诱导多酚氧化酶二级结构的重排, 破坏三级结构而导致 PPO 失活, 从而减缓菇体的褐变软化进程。还有研究报道指出, 交流电场 (600 kV/m, 50 Hz, 120 min) 能抑制平菇中多酚氧化酶和脂氧合酶的活性, 延缓褐变和氧化的进程^[64]。

2.8.3 磁场保鲜

磁场保鲜是一种温和的新型保鲜手段, 通过低

强度磁场影响细胞膜通透性, 降低酶活性, 抑制微生物生长^[65]。杨未尧^[12]研究发现, 磁场处理主要通过抑制微生物生长来达到保鲜作用, 双孢蘑菇分别经 2 mT 的静磁场和交变磁场处理后, 在贮藏末期其微生物总量相较于未处理组的微生物总量分别减少了 17.79%、25.08%, 且磁场处理不会破坏双孢蘑菇的正常生理代谢。磁场保鲜技术在果蔬保鲜中具有一定的应用潜力, 尤其对于需要营养高、保质期长、安全性高的食品保鲜具有一定优势。受到成本和技术要求的限制, 磁场保鲜技术的应用还有待进一步研究和推广。

3 结语

采后食用菌在内因和外因作用下会发生褐变软化、营养流失等不可逆的品质劣变现象, 导致其贮藏期大大缩短。通过有效的保鲜处理能减缓食用菌的品质劣变过程, 减少损耗率, 提高经济效益。物理技术在保鲜方面应用历史已久, 且扮演着重要角色, 它主要借用外力杀灭贮藏环境及食用菌表面的微生物, 抑制酶的活性和新陈代谢, 且对食用菌的外观品质和营养物质的影响较小, 是高效可行、无残留的保鲜方式。尽管物理保鲜技术已经取得了显著进步, 但在实际应用中仍然存在一些挑战, 如光照保鲜加工时间长, 辐照方法可能使食用菌产生不愉快气味, 减压保鲜易使食用菌风味减淡, 超声方法会增加食用菌的水分, 导致其不耐贮藏。此外, 辐照设备、减压设备成本昂贵, 脉冲强光、低温等离子体等技术的杀菌机制及安全性还未得到确切验证, 这些因素限制了其广泛应用。总之, 各种物理技术都具有其独特的保鲜作用, 但在实际应用中, 需要综合考虑食用菌的特性、操作条件和经济效益等因素, 选择最适宜的保鲜方式。

综上所述, 物理保鲜技术将继续在食用菌保鲜中发挥主要作用。为了提升鲜食食用菌品质, 应进一步研究和改进物理技术, 以提高其经济效益和技术成熟度。纳米材料与物理技术的联用为食用菌的保鲜提供了全新的解决方案, 成为未来研究的一个重要方向。物理保鲜方法的环保性和可持续性将受到持续关注, 研究和开发环保型的包装材料和能源将成为一种趋势。深入探索保鲜机理, 从分子、基因水平等角度揭示物理技术对食用菌营养成分、生物活性的具体影响, 进一步推动食用菌保鲜技术的发展, 为提高食用菌的贮藏品质 and 经济效益提供有力支持。

参考文献:

- [1] DAS A K, NANDA P K, DANDAPAT P, et al. Edible Mushrooms as Functional Ingredients for Development of Healthier and more Sustainable Muscle Foods: A

- Flexitarian Approach[J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2463.
- [2] LI C, XU S. Edible Mushroom Industry in China: Current State and Perspectives[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2022, 106(11): 3949-3955.
- [3] 康孟利, 宣晓婷, 林旭东, 等. 食用菌保鲜技术研究及其在花菇保鲜上的应用[J]. *农产品加工*, 2023(10): 76-80.
- KANG M L, XUAN X T, LIN X D, et al. Study on Fresh-Keeping Technology of Edible Fungi and Its Application in Mushroom Preservation[J]. *Farm Products Processing*, 2023(10): 76-80.
- [4] GUO Y, CHEN X, GONG P, et al. Advances in Post-harvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus Eryngii*[J]. *Foods*, 2023, 12(5): 1046.
- [5] MARÇAL S, SOUSA A S, TAOFIQ O, et al. Impact of Postharvest Preservation Methods on Nutritional Value and Bioactive Properties of Mushrooms[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 418-431.
- [6] 李江阔, 颜碧, 张鹏. 柿果实采后保鲜技术研究进展[J]. *包装工程*, 2019, 40(11): 1-8.
- LI J K, YAN B, ZHANG P. Research Progress on Post-harvest Preservation Technology of Persimmon[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(11): 1-8.
- [7] ZHANG K, PU Y, SUN D. Recent Advances in Quality Preservation of Postharvest Mushrooms (*Agaricus Bisporus*): A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 78: 72-82.
- [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] 唐建新, 王佳莉, 英丽美, 等. 果蔬采后生理代谢变化及调控机制研究进展[J]. *包装工程*, 2022, 43(5): 91-99.
- TANG J X, WANG J L, YING L M, et al. Advances in Physiological Metabolism Changes and Regulation Mechanism of Harvested Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(5): 91-99.
- [10] LI L, KITAZAWA H, WANG X, et al. Regulation of Respiratory Pathway and Electron Transport Chain in Relation to Senescence of Postharvest White Mushroom (*Agaricus Bisporus*) under High O₂/CO₂ Controlled Atmospheres[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(16): 3351-3359.
- [11] SINGH P, LANGOWSKI 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.
- [12] 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: 3-34.
- YANG M Y. Study on the Combined Preservation Technology of *Agaricus Bisporus*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020: 3-34.
- [13] 程曦, 张敏, 傅阳, 等. 减压贮藏对双孢菇保鲜品质的影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(8): 110-114.
- CHENG X, ZHANG M, FU Y, et al. Effect of Hypobaric Storage on Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(8): 110-114.
- [14] 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.
- [15] LI D, QIN X, TIAN P, et al. Toughening and Its Association with the Postharvest Quality of King Oyster Mushroom (*Pleurotus Eryngii*) Stored at Low Temperature[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 1092-1100.
- [16] SUN L, ZHANG Z, XIN G, et al. Advances in Umami Taste and Aroma of Edible Mushrooms[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 176-187.
- [17] ZHOU J, FENG T, YE R. Differentiation of Eight Commercial Mushrooms by Electronic Nose and Gas Chromatography-Mass Spectrometry[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015: 1-14.
- [18] LIU Q, CUI X, SONG Z, et al. Coating Shiitake Mushrooms (*Lentinus Edodes*) with a Polysaccharide from *Oudemansiella Radicata* Improves Product Quality and Flavor during Postharvest Storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 352: 129357.
- [19] 李文, 陈万超, 杨焱, 等. 香菇生长过程中挥发性风味成分组成及其风味评价[J]. *核农学报*, 2018, 32(2): 325-334.
- LI W, CHEN W C, YANG Y, et al. Volatile Flavor Components and Flavor Quality Evaluation of *Lentinula Edodes* Harvested at Different Growth Stages[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(2): 325-334.
- [20] SHI D, ZHOU R, FENG X, et al. Effects of Low-dose γ -Irradiation on the Water State of Fresh *Lentinula Edodes*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108764.
- [21] 孙倩倩. 短时减压处理延缓双孢蘑菇衰老的机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 2-26.
- SUN Q Q. The Mechanism of Short Hypobaric Treat-

- ments Delayed Aging of *Agaricus Bisporus*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016: 2-26.
- [22] LI R, ZHENG Q, LU J, et al. Chemical Composition and Deterioration Mechanism of *Pleurotus Tuoliensis* during Postharvest Storage[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127731.
- [23] 杨国辉, 江丹霞, 武少兰, 等. 聚赖氨酸联合 1-MCP 处理对草菇保鲜效果的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3347-3359.
- YANG G H, JIANG D X, WU S L, et al. Effects of Combined Treatment of ϵ -Polylysine and 1-Methylcyclopropene on the Storage Quality of *Volvariella Volvacea* Fruiting Bodies[J]. Mycosystema, 2021, 40(12): 3347-3359.
- [24] 何政宇, 彭郁, 王坤立, 等. 速冻方式对杏鲍菇品质特性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(7): 143-146.
- HE Z Y, PENG YU, WANG K L et al. Effects of Different Quick-Freezing Processes on the Quality Properties of *Pleurotus Eryngii*[J]. The Food Industry, 2019, 40(7): 143-146.
- [25] 张毅航, 方东路, 仲磊, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥对猴头菇不同部位风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 58-67.
- ZHANG Y H, FANG D L, ZHONG L, et al. Effects of Hot Air-Drying and Vacuum Freeze-Drying on Flavor Components in Different Parts of *Hericium Erinaceus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 58-67.
- [26] 韩春然, 鲁焱兴, 黄赫雁. 两种包装材料结合氩气保鲜对香菇品质的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 52-57.
- HAN C R, LU Y X, HUANG H Y. Effects of Two Kinds of Packing Materials Combined with Argon Preservation on Mushroom Quality[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 52-57.
- [27] 张沙沙, 周镭, 罗晓莉, 等. 气调贮藏对兰茂牛肝菌采后生理生化及品质的影响[J]. 中国食用菌, 2022, 41(6): 75-81.
- ZHANG S S, ZHOU P, LUO X L, et al. Effects of Controlled Atmosphere Storage on Postharvest Physiology, Biochemistry and Quality of *Lanmaoa Asiatica*[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(6): 75-81.
- [28] LYN F H F, MARYAM A Z A, NOR-KHAIZURA M A R, et al. Application of Modified Atmosphere and Active Packaging for Oyster Mushroom (*Pleurotus Ostreatus*)[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100451.
- [29] POGORZELSKA-NOWICKA E, HANULA M, WOJTASIK-KALINOWSKA I, et al. Packaging in a High O₂ or Air Atmospheres and in Microperforated Films Effects on Quality of Button Mushrooms Stored at Room Temperature[J]. Agriculture, 2020, 10(10): 479.
- [30] FENG Y, XU H, SUN Y, et al. Review of Packaging for Improving Storage Quality of Fresh Edible Mushrooms[J]. Packaging Technology and Science, 2023, 36(8): 629-646.
- [31] 李萍, 于晋泽, 张娜, 等. 不同包装材料对羊肚菌保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 163-169.
- LI P, YU J Z, ZHANG N, et al. Effects of Different Packaging Materials on the Preservation of *Morchella*[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(23): 163-169.
- [32] YE S, CHEN M, LIU Y, et al. Effects of Nanocomposite Packaging on Postharvest Quality of Mushrooms (*Stropharia Rugosoannulata*) from the Perspective of Water Migration and Microstructure Changes[J]. Journal of Food Safety, 2023, 43(4): 15.
- [33] ZHANG L, LIU Z, SUN Y, et al. Combined Antioxidant and Sensory Effects of Active Chitosan/Zein Film Containing A-Tocopherol on *Agaricus Bisporus*[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100470.
- [34] AKRAM K, AHN J J, YOON S R, et al. Quality Attributes of *Pleurotus Eryngii* Following Gamma Irradiation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 66: 42-47.
- [35] YURTTAS Z S, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ E. Combined Vacuum Impregnation and Electron-Beam Irradiation Treatment to Extend the Storage Life of Sliced White Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*)[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(1): 8.
- [36] 张玉, 周冉冉, 高虹, 等. 低剂量电子束辐照对香菇采后抗氧化能力的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 70-76.
- ZHANG Y, ZHOU R R, GAO H, et al. Effect of Postharvest Low Dose Electron Beam Irradiation on the Antioxidant Capacity of *Lentinula Edodes*[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(12): 70-76.
- [37] 斯琴图雅, 王强, 张玉宝, 等. 电子束辐照对滑菇保鲜效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(27): 166-168.
- SIQIN T Y, WANG Q, ZHANG Y B, et al. Effect of Electron Beam Irradiation on the Preservation of *Pholiota Nameko*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(27): 166-168.
- [38] DONG S, GUO J, YU J, et al. Effects of Electron-Beam Generated X-Ray Irradiation on the Postharvest Storage

- Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 80: 103079.
- [39] SHI D, YIN C, FAN X, et al. Effects of Ultrasound and Gamma Irradiation on Quality Maintenance of Fresh *Lentinula Edodes* during Cold Storage[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131478.
- [40] GHASEMI-VARNAMKHAHI M, MOHAMMAD-RAZDARI A, YOOSEFIAN S H, et al. Effects of the Combination of Gamma Irradiation and Ag Nanoparticles Polyethylene Films on the Quality of Fresh Bottom Mushroom (*Agaricus Bisporus* L)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42: e13652.
- [41] MAMI Y, PEYVAST G, ZIAIE F, et al. Improvement of Shelf Life and Postharvest Quality of White Button Mushroom by Electron Beam Irradiation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(4): 1673-1681.
- [42] PAN M, YANG J, LIU K, et al. Irradiation Technology: an Effective and Promising Strategy for Eliminating Food Allergens[J]. Food Research International, 2021, 148: 110578.
- [43] ZHONG Y, DONG S, CUI Y, et al. Recent Advances in Postharvest Irradiation Preservation Technology of Edible Fungi: A Review[J]. Foods, 2022, 12(1): 103.
- [44] 李燕杰, 黄佳佳, 东方, 等. 电子束辐照对三种香辛料的杀菌效果及香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 19-23.
- LI Y J, HUANG J J, DONG F, et al. Effects of Electron Beam Irradiation on Sterilization and Aroma Components of Three Spices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(16): 19-23.
- [45] 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. Effects of Shortwave Ultraviolet Treatment on the Browning of Postharvest *Lentinula Edodes*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(5): 1129-1135.
- [46] 蔡继业, 房祥军, 韩延超, 等. 中波紫外线处理对香菇采后维生素 D₂ 含量及生化品质的影响研究[J]. 核农学报, 2021, 35(12): 2766-2775.
- CAI J Y, FANG X J, HAN Y C, et al. Effects of UV-B Treatment on Vitamin D₂ Content and Physiology and Biochemistry Properties of *Lentinus Edodes*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(12): 2766-2775.
- [47] YU X, ZHENG P, ZOU Y, et al. A Review on Recent Advances in LED-Based Non-Thermal Technique for Food Safety: Current Applications and Future Trends[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(25): 7692-7707.
- [48] 朱凯, 吴伟杰, 房祥军, 等. 发光二极管蓝光结合紫外线处理对鲜切杏鲍菇贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(09): 223-231.
- ZHU K, WU W J, FANG X J, et al. Effect of Light Emitting Diode Blue Light Combined with Ultraviolet Treatment on the Storage Quality of Fresh-Cut *Pleurotus Eryngii*[J]. Food Science, 2022, 43(09): 223-231.
- [49] DAVIDOVIC M, KOSTIC M. Comparison of Energy Efficiency and Costs Related to Conventional and LED Road Lighting Installations[J]. Energy, 2022, 254: 124299.
- [50] OMS-OLIU G, AGUILÓ-AGUAYO I, MARTÍN-BELLOSO O, et al. Effects of Pulsed Light Treatments on Quality and Antioxidant Properties of Fresh-Cut Mushrooms (*Agaricus Bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(3): 216-222.
- [51] 周婷婷, 曹少谦, 张境, 等. 脉冲强光处理对双孢蘑菇贮藏品质的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(5): 994-1001.
- ZHOU T T, CAO S Q, ZHANG J, et al. Effects of Intense Pulsed Light Treatment on Storage Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(5): 994-1001.
- [52] FERNÁNDEZ M, HOSPITAL X F, CABELLOS C, et al. Effect of Pulsed Light Treatment on *Listeria* Inactivation, Sensory Quality and Oxidation in Two Varieties of Spanish Dry-Cured Ham[J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126294.
- [53] ZHANG W, LI Y, JIANG Y, et al. A Novel Strategy to Improve Cloud Stability of Orange-Based Juice: Combination of Natural Pectin Methyltransferase Inhibitor and High-Pressure Processing[J]. Foods, 2023, 12(3): 581.
- [54] 杨华, 喻歆茹, 钱德康, 等. 超高压处理对鲜杏鲍菇品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 164-169.
- YANG H, YU X R, QIAN D K, et al. Effect of High Hydrostatic Pressure Treatment on the Quality of *Pleurotus Eryngii*[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 164-169.
- [55] HU X, MA T, AO L, et al. Effect of High Hydrostatic Pressure Processing on Textural Properties and Microstructural Characterization of Fresh-Cut Pumpkin (*Cucurbita Pepo*)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(4): e13379.
- [56] 陈敬鑫, 徐帆, 葛永红, 等. 采后果实减压贮藏技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(8): 250-255.

- CHEN J X, XU F, GE Y H, et al. Advances in Hypobaric Storage of Postharvest Fruits[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(8): 250-255.
- [57] ZAN X, JIA W, ZHUANG H, et al. Energy Status and Mitochondrial Metabolism of *Volvariella Volvacea* with Controlled Ultrasound Treatment and Relative Humidity[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 167: 111250.
- [58] 胡宇欣, 林海璐, 林晓彤, 等. 超声处理对鹿茸菇贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 186-193.
- HU Y X, LIN H L, LIN X T, et al. Effect of Ultrasound Treatment on the Storage Quality of *Lyophyllum Decastes*[J]. Food Science, 2023, 44(3): 186-193.
- [59] NASRI E, KHADEMI O, SABA M K, et al. Extension of Button Mushroom Storability by Ultrasound Treatment in Combination with Calcium Lactate[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(1): 54-62.
- [60] SUBRAHMANYAM K, GUL K, SEHRAWAT R, et al. Impact of in-Package Cold Plasma Treatment on the Physicochemical Properties and Shelf Life of Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*)[J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102425.
- [61] POURBAGHER R, ABBASPOUR-FARD M H, KHOMEIRI M, et al. Effects of Gas Type and Cold Plasma Treatment Time on *Lecanicillium Fungicola* Spores Reduction and Changes in Qualitative, Chemical, and Physiological Characteristics of Button Mushroom during Postharvest Storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(10): 16.
- [62] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 284-292.
- QI M Y, LIU Q Y, SHI S S, et al. Recent Progress in the Application of High-Voltage Electric Field Technology in Food Sterilization[J]. Food Science, 2022, 43(11): 284-292.
- [63] 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: 111230.
- [64] HSIEH C C, CHANG C, WONG L W, et al. Alternating Current Electric Field Inhibits Browning of *Pleurotus Ostreatus* Via Inactivation of Oxidative Enzymes during Postharvest Storage[J]. LWT, 2020, 134: 110212.
- [65] LI W, MA H, HE R, et al. Prospects and Application of Ultrasound and Magnetic Fields in the Fermentation of Rare Edible Fungi[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105613.