鲜蒜采后贮藏品质劣变、保鲜技术应用及分析方法研究进展

丁惠敏[1,2]，王文亮[1]，乔丽萍[2]，王延圣[1]，弓志青[1]，甲承立[1]，侯福荣[1]，史君彦[1*]
（1.山东省农业科学院农产品加工与营养研究所，农业部新食品资源加工重点实验室，山东济南 250100）
（2.天津科技大学食品科学与工程学院，天津 300457）

摘要：大蒜是常见的药食两用植物，采后仍是有生命活动的有机体，在贮藏过程中易出现发芽、褐变、软化、腐烂等品质劣变现象，继而导致营养物质损失，甚至造成严重的经济损失。因此，采取一定的保鲜措施，如低温、气调、涂膜等方法可以有效减缓鲜蒜的生理活动，降低呼吸强度，从而保持其营养物质，达到贮藏保鲜的目的；此外，通过转录组及代谢组学的分析方法分析大蒜的品质，能够更精准地把握鲜蒜的品质变化。该文全面总结了鲜蒜在采后贮藏期间生理变化及品质劣变的现象，系统梳理了鲜蒜采后品质保鲜技术应用和分析方法的研究进展，为未来鲜蒜高品质产品开发和产业提质增效提供理论参考。

关键词：鲜蒜；品质劣变；采后贮藏；保鲜技术；分析方法

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0502

Research Progress on Storage Quality Deterioration, Preservation Technology Application and Analysis Methods of Fresh Garlic after Harvest

DING Huimin[1,2], WANG Wenliang[1], QIAO Liping[2], WANG Yansheng[1], GONG Zhiqing[1], JIA Chengli[1], HOU Furong[1], SHI Junyan[1*]
(1.Institute of Agricultural Processing and Nutrition,Shandong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Jinan 250100, China)(2.Tianjin University of Science & Technology College of Food Science and Engineering, Tianjin 300457, China)

Abstract: Garlic is a common medicinal and edible plant. It is still an organism with life activities after harvest. It is prone to quality deterioration such as germination, browning, softening and decay during storage, which in turn leads to nutrient loss and even serious economic losses. Therefore, taking certain preservation measures, such as low temperature, controlled atmosphere, coating and other methods can effectively slow down the physiological activity of fresh garlic, reduce the respiratory intensity, so as to maintain its nutrients and achieve the purpose of storage and preservation; in addition, the analysis of the quality of garlic by transcriptome and metabolomics analysis methods can more accurately grasp the quality changes of garlic. This paper comprehensively summarized the physiological changes and quality deterioration of fresh garlic during post-harvest storage, and systematically reviewed the research progress of the application and analysis methods of post-harvest quality preservation technology of fresh garlic, so as to provide theoretical reference for the development of high-quality products and industrial quality and efficiency of fresh garlic in the future.

Key words: fresh garlic; quality deterioration; postharvest storage; preservation technology; analysis method

大蒜（*Allium sativum* L.）属于石蒜科葱属植物的地下鳞茎，是常见的药食两用植物，原产于亚洲西部或欧洲，

收稿日期：2025-04-10；修回日期：2025-08-07；接受日期：2025-08-13
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFD1600203）；山东省重点研发计划（科技型中小企业创新能力提升工程）项目（2024TSGC0617）；山东省农业科学院农业科技创新工程项目（CXGC2025C09；CXGC2025G05）
作者简介：丁惠敏（2000-），女，硕士研究生，研究方向：农产品加工及贮藏工程，E-mail：huimin0973@163.com
通讯作者：史君彦（1988-），女，博士，助研，研究方向：农产品贮运保鲜及分子生物学研究，E-mail：shijunyan0130@126.com

汉朝时被引种到中国，在世界上已有漫长的栽培历程[1]。大蒜里含有丰富的生物活性物质，如大蒜素、大蒜多糖、配糖体等，具有增强免疫力、降血压、抗肿瘤、抗菌、抗病毒、抗氧化、抗炎等功效[2]，深受人们的喜爱。日常生活中，鲜大蒜在食用时存在去皮困难等问题[3,4]，因此去皮后的蒜瓣即蒜米亦受到消费者的青睐。然而，鲜蒜在贮运过程中，由于机械损伤、高温高湿等外界环境因素的影响，易出现发芽、褐变、糠心、腐烂霉变等问题，这对鲜蒜采后品质保持极为不利。

随着人们生活水平的提高和饮食需求的多样化，对鲜蒜的品质要求也不断提高，因此通过一定的技术手段对其进行保鲜处理迫在眉睫。常见的鲜蒜贮藏保鲜方法有物理保鲜和化学保鲜，其中低温贮藏是较为有效的物理保鲜方式，可以有效减低鲜蒜的发芽率、呼吸作用和减少水分散失[5]。化学保鲜主要是使用化学试剂进行涂膜或浸泡抑制鲜蒜发芽及微生物的生长繁殖，从而延缓其生理代谢[6]，如壳聚糖、羧甲基纤维素（1:1）涂膜液保鲜技术[7]，外源化学保鲜剂青鲜素处理[8]，羧甲基纤维素复合膜等对蒜米进行涂膜处理[9]。保鲜方法不仅保持了鲜蒜良好的外观品质和营养价值，还能最大程度上保留其生物活性物质，同时减少腐烂、发芽等问题，显著延长其货架期。

中国是世界上大蒜生产、出口、消费最大的国家，并且随着饮食的多样化发展，生食大蒜已逐渐渗透人们的生活[10]。尽管大蒜产业在全球的产业链巨大，但当前大蒜采后在流通阶段由于发芽、褐变、软化、腐烂等原因损失严重，故需要采取一定的手段对其进行保鲜处理以减少产业损失。该文全面总结了鲜蒜在采后贮藏期间生理变化及品质劣变的现象，系统梳理了鲜蒜采后品质保鲜技术应用和分析方法的研究进展，为未来鲜蒜高品质产品开发和产业提质增效提供理论参考。

1 鲜蒜采后品质劣变现象

鲜蒜在采后由于受外界湿度、微生物（原真菌和细菌）、昆虫、温度以及机械损伤等的影响，在贮藏期间易出现腐烂、发芽及虫害的现象（图 1）。

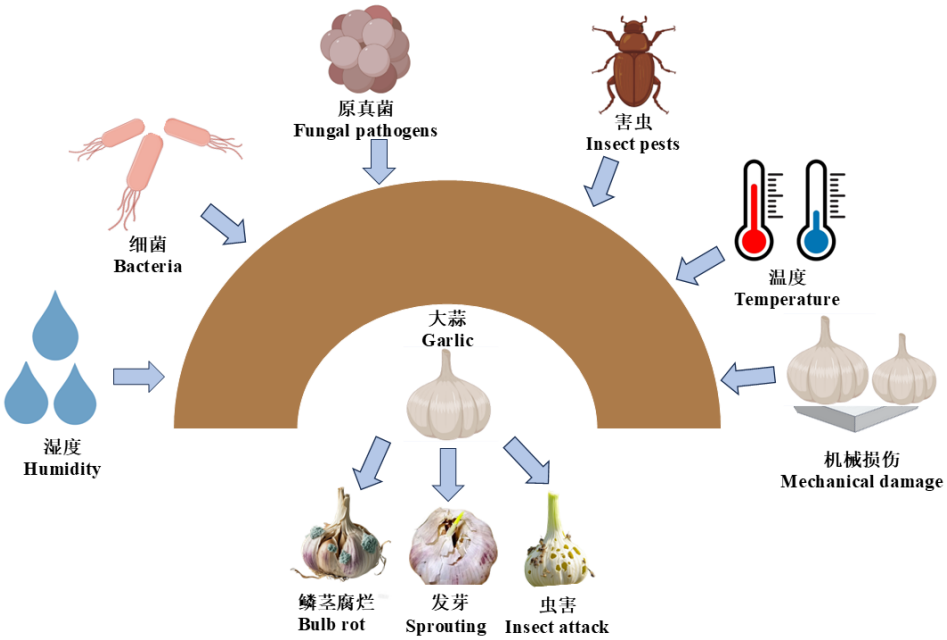

图 1 鲜蒜采后贮藏品质劣变的因素

Fig.1 Factors of storage quality deterioration of fresh garlic after harvest

注：图中部分元素来源于 FigDraw 2.0 软件。

1.1 发芽

大蒜采收后进入休眠期，休眠结束后，大蒜中的植物激素赤霉素（Gibberellic Acid，GA）含量增加，脱落酸含量降低，促生长激素含量增加，刺激细胞分裂、促进细胞伸长，从而促使大蒜发芽[11,12]。大蒜经一段时间的低温处理可迅速打破休眠期，促进其在室温下的发芽[13,14]。贮藏环境中湿度和气体成分含量也是影响大蒜休眠期长

短的关键因素，充足的 O_2 以及适宜的湿度能够显著促进大蒜发芽[14]。大蒜解除休眠期后，在适宜的环境下开始萌芽、长叶，会导致在此过程中储存在蒜瓣中的营养物质开始被大量消耗，细胞内的储备物质开始转化、降解并外运，大蒜的呼吸代谢变得旺盛，加速大蒜的衰老。

1.2 褐变

大蒜在流通过程中由于机械损伤，导致大蒜中的酚类物质和多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）与空气接触后生成醌类物质从而引起大蒜发生褐变现象[15]；在常温无氧状态下，其中的糖类分子在糖酵解阶段分解成了乙醇和乳酸并积累在细胞内，然后与氨基酸结合形成了一系列的化合物，发生非酶促褐变，从而导致色泽变化[16]。温度是影响大蒜非酶促褐变的重要因素之一，通过简单的热烫处理可以有效降低酶的活性，从而抑制其酶促褐变[15]。

1.3 软化

大蒜的质地软硬会直接影响消费者的食用感受。在贮藏期间，大蒜会随着水分和营养物质流失导致硬度下降[17]，大蒜中的果胶物质经由果胶甲酯酶（Pectin Methylesterase，PME）和多聚半乳糖醛酸酶（Polygalacturonase，PG）等酶类催化降解，使得细胞壁间的连接变得松散，细胞间结合力下降，导致大蒜组织变软[18]；同时，纤维素和半纤维素酶活性的增强，诱使大蒜细胞壁的刚性结构被破坏，引起大蒜质地变软[19]。

1.4 糠心

糠心是指大蒜的鳞茎在生长后期或贮藏过程中，蒜瓣内部组织变得松软、干瘪，形成空心的状态[20]。大蒜在休眠期前期，其鳞茎组织呈结构适应性变化。蒜瓣薄壁细胞内的细胞核保持规则的球状，染色质呈现高密度凝聚态，核膜与胞质溶胶间存在明显的电子致密区带，此时幼芽原基被多层富含脂质基质的薄壁细胞紧密环绕，维管束鞘细胞在芽体基部形成物理屏障，导致芽体伸长受到限制[21]；休眠期后期，蒜瓣细胞核体积变大，核与胞质间的分界变得模糊不清，蒜瓣中央缝隙不断扩大，形成较宽的通道，呈现糠心的现象[22]，这亦为潜伏幼芽的生长提供了充分的条件。

1.5 腐烂

大蒜在贮运过程中，由于受到机械损伤等外力因素的影响，导致表皮受损，细胞壁、细胞膜破裂、汁液外渗。当遭受机械损伤的大蒜鳞茎处于适宜温湿度的贮藏环境中时，细菌及真菌等微生物类群伺机侵染，同时空气中的霉菌孢子可附着于大蒜表皮损伤部位并定植繁殖[23]。在此过程中，损伤诱导的生理应激反应引发大蒜细胞呼吸代谢异常增加，呼吸速率显著升高，进而导致可溶性糖与蛋白质等物质含量下降，同时伴随酚类物质的异常积累。上述生理生化变化致使鳞茎表皮光泽度丧失、色泽暗沉，乃至形成深色病斑；受侵染组织因细胞组织结构破坏而呈现软化现象，最终在长期贮藏过程中发展为组织腐烂[24]。

1.6 风味品质劣变

大蒜的风味物质主要来源于其含有的硫化合物，如蒜氨酸等。大蒜在贮藏期间，由于贮藏时间过长或贮藏条件恶劣，导致大蒜开始腐烂，在腐烂的过程中，微生物分解大蒜的细胞结构，其中的蒜氨酸酶与烯丙基半胱氨酸亚砜（蒜氨酸）反应，产生具有挥发性的硫代亚磺酸酯类物质[25]（图 2），使其具有强烈的辛辣味，同时，微生物的代谢活动增强，产生一些新的化合物，破坏大蒜原有的风味。细菌和真菌产生的酶分解大蒜中的含硫化合物[26]，使大蒜的辛辣味减弱，而微生物自身产生的代谢物质如氨、硫化氢等物质混入大蒜的风味中，使大蒜从原来的辛辣、浓郁变得带有腐臭味和刺鼻的气味。大蒜素极不稳定，遇光、热等会发生降解和重排，反应生成二烯丙基线性硫醚（如二烯丙基一硫醚（Diallyl Sulfide，DAS）、二烯丙基二硫醚（Diallyl Disulfide，DADS）、二烯丙基三硫醚（Diallyl Trisulfide，DATS）、二烯丙基四硫醚（Diallyl Tetrasulfide，DATTS））、阿霍烯及环硫化物等物质[27]（图 3），使得原本的风味物质大量流失，甚至使大蒜产生令人不愉快的气味。亦有研究发现[28]，当大蒜损伤程度越大、贮藏温度越高时，导致呼吸高峰提前，风味物质含量显著减少。

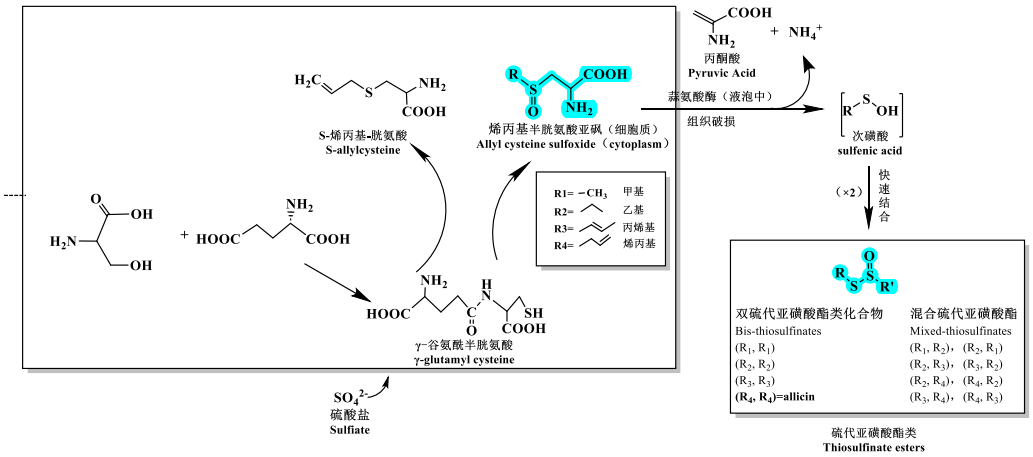

图 2 大蒜中主要风味物质的形成机理

Fig.2 Formation mechanism of main flavor substances in garlic

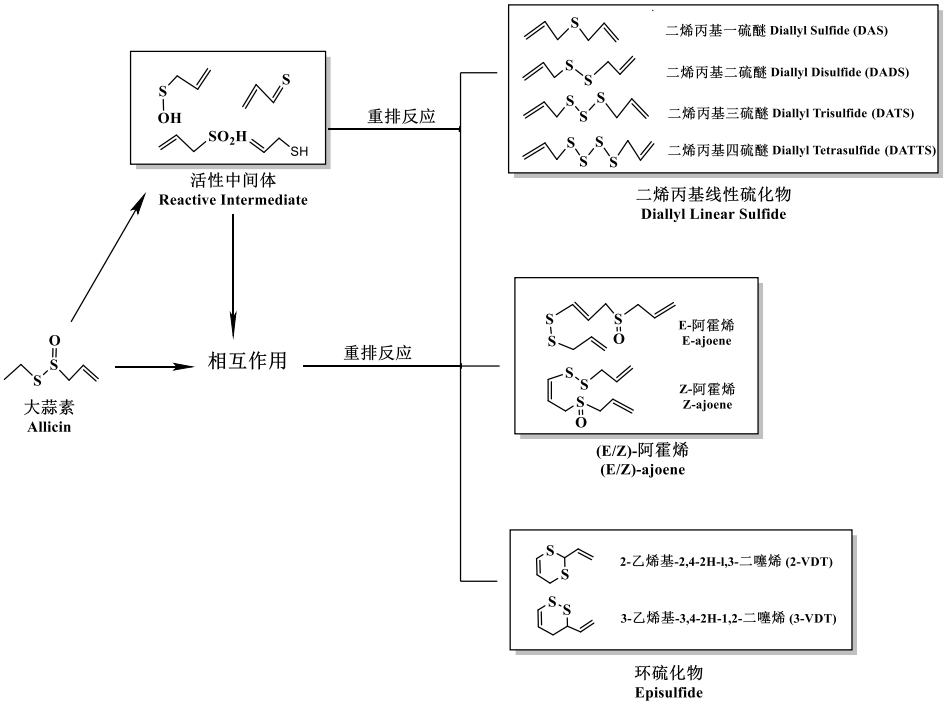

图 3 大蒜素的主要降解产物

Fig.3 The main degradation products of allicin

2 鲜蒜贮藏保鲜技术

鲜蒜的保鲜技术主要有物理保鲜、生物和化学源保鲜、多种方法协同处理保鲜等，其中物理保鲜方法具体如表 1 所示。

表 1 各保鲜手段对鲜蒜保鲜的影响

Table 1 Effects of different preservation methods on preservation of fresh garlic

保鲜方法	保鲜对象	保鲜方法	技术原理	结果与影响	优势	参考文献
低温保鲜	大蒜	4 ℃ 0 ℃	通过低温（0 ℃/4 ℃）抑制大蒜生理代谢及微生物活性，延缓腐烂	保留较高的营养物质 与常温贮藏相比，有效抑制腐烂变质，并维持良好的清脆口感	操作简便，适用性广，减缓营养流失维持清脆口感	[29] [16]
辐射保鲜	大蒜	0.12 kGy γ射线 40~90 Gy ^{60}Co γ射线	利用γ射线破坏蒜芽细胞结构或 DNA，抑制发芽，同时杀菌	在室温环境中贮藏 195 天，失重率范围为 32.22%~38.48% 与对照组相比，出库后发芽	适合规模化处理，高效省时；可以精准干预蒜芽生理和生物活性；具	[30] [31] [32]

		80 Gy^{60}Co γ射线		率最高仅为 40% 与未辐照组相比，可以 100%抑制发芽	有可持续性	
气调保鲜	蒜米 大蒜	80% O_2 3.5% O_2+5% CO_2	调节贮藏环境中 O_2和 CO_2浓度，降低呼吸作用，延缓衰老	有效减缓生命活动，贮藏时间可达 8~11 天 能够保持大蒜良好的贮藏品质	绿色安全，无化学残留；灵活适配不同需求，协同增效	[33] [34]
包装材料	蒜米 鲜蒜	PE 包装 0.03 mm PVC 膜	利用 PE、PVC 等薄膜形成物理屏障，减少水分流失和微生物污染，调节气体交换速率	贮藏 180 天，有效保持其品质 质量，具有较高的食用价值 有效保持其风味品质和细胞形态结构	低成本、易操作且与多样化适配	[35] [36]
臭氧保鲜	蒜米 大蒜	5 ppm 6 μL/L	利用臭氧的强氧化性杀菌，并抑制酶活性，维持营养物质	硬度比 CK 组高 19.79%，并有效保持其营养物质 有效抑制桔青霉、赤霉的生长繁殖	广谱杀菌，降低微生物腐败风险；安全环保，无化学残留	[37] [38]
高温应激保鲜	大蒜	35 ℃ 100 ℃，45 s	通过短期高温可破坏蒜芽相关酶活性，干预生理休眠	降低 GGTs 的活性，维持大蒜的品质 可以有效防止因冷冻引起的质地和颜色变化	工艺可控，干预大蒜的生理休眠	[39] [40]
涂膜保鲜	蒜米	海藻酸钠涂膜 1.5%壳聚糖 玉米醇溶蛋白 黄原胶-羧甲基纤维素	通过天然高分子材料在蒜米表面形成薄膜，抑制呼吸和水分流失，同时发挥其抗菌作用	贮藏 25 天，总糖含量比 CK 组高了 0.81%抑制其呼吸、发芽以及 MDA 的生成在 15 ℃中可贮藏 15 天，蒜米仍维持着较高的硬度有效抑制蒜米的呼吸强度，保持蒜米的水分含量、硬度、总糖和还原糖含量	抗菌防腐，安全环保，契合绿色保鲜要求；可以形成“外屏障+内调控”的双重作用	[41] [4] [42] [9]

2.1 物理保鲜

物理保鲜技术是指通过物理方法来延长食品的保存期限，同时保持其原有品质的一系列技术[43]，如高温应激保鲜技术、低温保鲜技术、辐射保鲜技术、气调保鲜技术、包装保鲜技术及臭氧保鲜技术等。

2.1.1 高温应激保鲜

果蔬采后对其进行应激化处理，可以有效提高其在贮藏过程中的品质[44]。研究发现[45]，大蒜采后给予高温干燥条件，可以使其迅速进入休眠期。进一步研究发现，接近 10 ℃下贮藏时，大蒜容易变绿，而在高于 20 ℃贮藏时可以有效抑制变绿现象的出现，这是由于较高的环境温度可以抑制 γ-谷氨酰转肽酶（γ-Glutamyl-transpeptidase, GGTs）的活性，在 35 ℃贮藏时，GGTs 随着贮藏时间的增加其活性下降[39,46]；Huang 等[47]90 ℃焯水 4 min 可以抑制大蒜变绿；Zhang 等[40]发现，通过热烫（100 ℃，45 s）预处理可以防止冷冻引起的质地和颜色变质，同时有助于保持大蒜的生物活性物质，高温应激保鲜适用于休眠期稳定、鳞片较厚的大蒜。

故高温应激处理通过调控酶活和休眠状态，在大蒜采后保鲜中展示出独特的优势，高温干燥可快速诱导休眠，抑制发芽；20 ℃以上贮藏可以有效防止变绿；热烫处理可优化冷冻大蒜的品质。但该技术需严格控制温度阈值和处理时间，避免造成脱水或微生物污染。

2.1.2 低温保鲜

低温保鲜法是利用低温技术，使食品保持在一个相对较低的温度，减缓其腐坏变质的速度。研究发现[48,49]，低温在果蔬保鲜中的应用效果显著。在低温环境下贮藏时，大蒜细胞内的酶活性降低，大蒜发芽所需的营养物质供应不足[29]，从而延缓其发芽时间，且经低温处理的蒜米在一定时间内可以较好地保持其硬度[7,30]。杨文哲等[16]将真空包装的大蒜分别在 0 ℃、4 ℃以及常温环境下进行贮藏，发现 0 ℃和 4 ℃可以有效维持大蒜的硬度，抑制其腐烂变质，降低失重率。Lu 等[50]研究发现经低温贮藏过的蒜米在室温下放置一段时间，蒜米容易发生绿变，这是由于在低温贮藏前期 γ-L-谷氨酰基-S-(反式-1-丙烯基)-L-半胱氨酸（GSPC）积累，后期 GSPC 转化为 S-(反式-1-丙烯基)-L-半胱氨酸（SPC）和 S-1-丙烯-L-半胱氨酸亚砜（1-PeCSO）所致，这说明低温贮藏可抑制其色素合成前提物质含量的变化及参与谷胱甘肽代谢和 NADPH 循环的关键酶活性和基因表达，因此，恒定的低温环境有利于

维持蒜米的硬度和外观品质。

综上可知，低温保鲜通过抑制酶活性、微生物繁殖及生理代谢，在鲜蒜保鲜中展现出显著优势，可有效维持其硬度，延缓发芽和腐烂。然而，低温贮藏后期的绿变问题需通过恒定温度控制或协同保鲜技术解决。未来研究可聚焦低温蒜米色素代谢的基因调控机制，以及低温与其他保鲜手段的协同效应，以进一步提升低温保鲜的实用性与经济性。

2.1.3 辐射保鲜

辐照贮藏法是指对所需贮藏保鲜的果蔬进行一定剂量辐照，从而达到延长其货架期的目的[51]。张璇等[31]研究发现，在大蒜休眠期间采用 40~90 Gy 的射线对其进行辐照，可以有效抑制其发芽，延长其货架期；谢宗传等[32]采用 ^{60}Co γ 射线以及电子束转换 X 射线对大蒜进行辐照，发现均可抑制发芽，且在大蒜休眠期采用 40 Gy 剂量辐照即可抑制其发芽，在幼芽萌发期，80 Gy 剂量辐照可达到抑制效果；Sharma 等[30]发现经 0.12 kGy 剂量的 γ 射线对大蒜进行辐照处理贮藏 195 d 后，能够保持良好的硬度、可溶性固形物、颜色、抗坏血酸和大蒜素，在常温环境下能储藏 4 个月。因此通过一定剂量的辐照可以有效抑制大蒜贮藏过程中发芽，从而达到延长货架期的目的。故辐照贮藏法通过电离辐射抑制大蒜发芽，具有剂量可控、保鲜效果显著的特点，0.12~0.2 kGy 剂量可在常温下维持大蒜品质 4 个月以上。该技术适合休眠期大蒜的规模化处理，但需要注意剂量优化以平衡发芽抑制与营养及风味物质的保留。

2.1.4 气调保鲜

气调保鲜是指通过调整和控制果蔬贮藏环境的气体比例，从而延长果蔬储藏寿命和货架期的一种技术[52]。通过不同包装调整大蒜贮藏内环境的气体成分比例，可以有效减少大蒜失重，保持其硬度[35]；唐仕荣等[33]研究高氧气调（80% O_2）对 4 ℃下贮藏蒜米的影响，发现 20% CO_2+80% O_2，以 N_2 作为平衡气体，可以延缓蒜米的生命活动、保持良好的营养价值并能延长其货架期至 8~11 天；于楠楠等[53]采用 10% CO_2+80% O_2+10% N_2 对蒜米进行气调包装处理，可以有效延长货架期；许建等[54]采用 3.5% O_2+5% CO_2+91.5% N_2 能够保持良好的贮藏特性和品质。结果表明，在 80% O_2 的高氧环境下以及 3.5% O_2+5% CO_2 的环境中可以较好地维持大蒜的品质。硅窗气调膜的作用是可以使袋内 CO_2 气体与与外界 O_2 进行交换，郭媛丽[17]的研究发现，使用硅窗气调膜处理六瓣红鲜蒜，可有效地保持鲜蒜的贮藏品质，其硬度、可溶性固形物含量保持较高的水平，过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶的活性也维持在较高的水平上；罗丹等[55]采用不同硅窗面积的气调包装袋对白皮大蒜进行保鲜处理，发现 6 cm^2 的硅窗面积可以有效缓解大蒜在贮藏过程中硬度、失重率、芽瓣比的剧烈变化，同时酒石酸、富马酸和柠檬酸的含量有明显的增加。自发气调包装（MAP）是一种基于生物呼吸动态调控的保鲜技术，果蔬通过自身的代谢呼吸和利用材料的透气特性，在密封环境中形成低氧与高二氧化碳的稳定微环境，果蔬消耗 O_2 并释放 CO_2，包装的气体渗透性促使气体自发进行内外交换，最终达到动态平衡状态，抑制其呼吸速率，延长果蔬贮藏期[56]。陈嘉琪等[57]研究发现，二氧化氯（ClO_2）缓释剂结合 MAP 处理（0.1 mmPE 袋），可使嫩鲜蒜在-1 ℃下贮藏 7 个月期间保持较好的硬度品质、较高的大蒜素含量以及较高的活性氧清除能力，有效延长贮藏期。

综上表明，气调保鲜通过精准调控环境的气体组成，在大蒜保鲜中展现出多维度优势；高氧环境适合短期保鲜并维持营养，低氧高二氧化碳体系利于长期贮藏，硅窗与 MAP 技术则提供了低成本、自动化的解决方案。未来需重点突破智能气调设备的成本控制、气体参数的动态优化以及复合保鲜技术的标准化应用，推动气调技术从实验室走向大蒜产后处理的全产业链，实现“精准气调+智能保鲜”的产业升级。

2.1.5 功能性包装材料保鲜

不同的包装材料对果蔬的呼吸作用有一定的影响。赵春燕等[36]在（0±0.5 ℃）条件下研究不同保鲜膜对嫩鲜蒜保鲜效果的影响，发现 0.03 mm 聚氯乙烯（Polyvinyl Chloride，PVC）膜可以有效降低鲜蒜的呼吸作用，减缓其因呼吸引起的失重、总糖、粗纤维等含量的变化，并较好地保持了鲜蒜的风味品质；Zhu 等[58]研制了一种聚乙烯防雾抗菌保鲜包装膜，通过向低密度聚乙烯（Low-Density Polyethylene，LDPE）添加纳米 ZnO 和表面活性剂（Surfactant，SF），发现随着纳米 ZnO 用量的增加，防雾性能和抗菌性能也逐渐增加，SF 的加入改善了纳米 ZnO 在薄膜中的分散性，在蔬菜中进行试验发现具有良好的保鲜效果。

综上，不同包装材料对果蔬呼吸作用的调控效果与其成分和结构密切相关。PVC 膜通过物理阻隔抑制呼吸，而 LDPE 复合膜通过纳米材料改性实现多功能协同保鲜。此类研究为果蔬贮存过程中的品质维持提供了多样化的技术路径，未来需在材料性能优化与环保之间寻求平衡，推动绿色保鲜技术的发展。

2.1.6 臭氧保鲜

臭氧是一种强氧化剂，具有消毒、杀菌的功能，能通过降解果蔬呼吸释放的乙烯，降低其新陈代谢，缓解生理老化过程，从而达到保鲜的目的[59]。曹琳等[38]研究发现，6 μL/L 臭氧浓度在 20 ℃下处理 20 min，可以有效抑制桔青霉，8 μL/L 臭氧浓度可以有效抑制匍枝根霉，并有效抑制大蒜在贮藏保鲜过程中微生物的生长繁殖；Aslam 等[60]发现臭氧水溶液具有有效的杀菌效果；Liu 等[37]将不同浓度臭氧结合不同的储存温度处理新鲜去皮大蒜，发现大蒜在 5 ppm 的臭氧度和 4 ℃下储存时保存效果最好，且 1.5~6 ppm 的臭氧处理有助于保持大蒜的营养。

故臭氧保鲜凭借其高效杀菌、无残留和低成本特性，成为大蒜采后处理的理想技术之一。5 ppm 臭氧配合 4 ℃低温可实现最佳保鲜效果，技能抑制微生物繁殖，又能维持大蒜素等功能成分。未来需重点开发智能化臭氧发生设备和复合保鲜体系，以解决浓度控制精度和极端环境适应性问题，推动臭氧技术在大蒜冷链物流和精深加工中的规模化应用。

2.2 生物源和化学源保鲜

生物源和化学源保鲜通常将生物来源物质或化学保鲜剂对大蒜涂膜、浸泡等方式进行处理，从而达到保鲜的目的[61]，涂膜法主要有浸染法、喷涂法和刷涂法。涂膜保鲜就是使用无毒无害材料使果实表面附上一层高分子的液态膜，干燥后形成一个半封闭环境，调控果蔬的生物代谢，降低果蔬因呼吸作用引起的营养物质大量消耗，同时维持果蔬的硬度和新鲜度，减少因病原菌的侵染而导致的腐烂[62]。

2.2.1 生物源保鲜

生物源保鲜是一种利用生物有机体（如微生物、动植物提取物等）或其代谢产物来延长食品等产品保质期、保持品质的保鲜方法[63]。朱嘉晖等[64]采用壳聚糖-明胶活性膜处理大蒜片可以使其 DPPH 清除率维持在 81.31%；5%大豆分离蛋白涂膜蒜米，可以有效抑制蒜米的呼吸作用强度，并保持其水分含量和可溶性固形物含量[65]；王兆升等[4]采用 1.5%的壳聚糖对蒜米进行涂膜处理，可以有效抑制蒜米的呼吸作用及 MDA 的生成。Torun 等[42]采用 15%牛奶蛋白和 20%玉米醇溶蛋白分别对去皮大蒜进行涂膜，发现在 15 ℃下蒜瓣的货架期分别延长了 10 d 和 15 d，但是观察到单独使用涂膜法保鲜时会因涂层破裂导致剥皮大蒜的重量损失和体积皱缩。

综上，生物源保鲜技术主要以壳聚糖、蛋白质等天然材料为核心，通过成膜性和生物活性实现大蒜保鲜，具有安全、低成本的优势。单一生物涂膜在短期保鲜中效果显著，但存在膜稳定性差、功能单一等问题。未来需通过“生物材料复合改性+多技术协同”策略，开发兼具抗氧化、抗菌、透气调控的智能生物膜，并与低温、气调等技术结合，构建全链条保鲜体系，推动生物源保鲜在大蒜产业化中的深度应用。

2.2.2 化学源保鲜

化学源保鲜主要是采用化学保鲜剂对食品进行涂膜、浸泡，从而达到保鲜的目的。Bae 等[66]采用 25%和 50%的乙醇对蒜米进行浸泡处理，可以有效抑制其褐变；胡传银等[67]发现蒜米在维生素 C+L-半胱氨酸+二氧化氯溶液中浸泡 6~8 min，可以有效抑制其发芽、绿变的速度；李瑜等[9]采用黄原胶-羧甲基纤维素复合膜液浸泡大蒜米 5 min，发现黄原胶-羧甲基纤维素复合膜可以有效抑制蒜米的呼吸强度，保持蒜米的水分含量、硬度、总糖含量和还原糖含量，对蒜米具有一定的保鲜效果；除此之外，Rejano 等[68]将新鲜大蒜去皮后，分别采取不同温度处理，使大蒜中的微生物和蒜氨酸酶灭活，然后再采用乳酸-乙酸混合酸和 5%盐水处理，可以有效的防止大蒜发生褐变。

因此，化学源保鲜技术通过酶活抑制、抗氧化和成膜作用，为大蒜提供了高效、经济的保鲜方案。乙醇、维生素 C 等化学试剂对褐变和发芽的抑制效果显著，但需注意残留风险和品质损伤。未来需重点开发“低剂量化学处理+智能缓释+生物相容性载体”的复合体系，同时推动绿色化学试剂的应用，以平衡保鲜效果与安全性，满足现代食品工业对清洁标签和可持续发展的需求。

2.3 多种保鲜方法协同处理保鲜

相比于单一的保鲜技术，多种保鲜方法协同处理的保鲜技术在大蒜保鲜上的应用可以弥补各种由于外界因素造成的不良影响。已有研究发现，将壳聚糖和羧甲基纤维素以 1:1 的比例制成溶液，对蒜米进行涂膜处理，外加高压电场处理后形成低温+涂膜+高压电场复合的处理方法，可以较好地保留蒜米营养物质[7]；低温协同海藻酸钠涂膜剂可以很好地保持去皮大蒜的品质[41]；曹琳等[69]在 1.5%壳聚糖涂膜中加入保鲜剂对鲜剥大蒜进行真空包装处理，发现贮藏 40 d 后，失重率和发芽率均较低，硬度与贮藏前相比仅下降了 5.13%，总糖和大蒜素维持在较高水

平。多种保鲜方法协同处理可以在鲜蒜保鲜过程中进行互补，这为未来鲜蒜保鲜产业的发展提供了很好的参考价值。

3 鲜蒜采后品质分析方法

品质分析方法是保障鲜蒜贮藏品质、延长货架期、支撑保鲜技术研发及推动产业标准化发展的关键环节。转录组和代谢组分析作为近年来果蔬保鲜领域的新兴技术，可通过检测生物体细胞的基因表达及代谢物，生成差异表达图谱[70]，系统解析鲜蒜休眠等进程中相关基因的表达网络调控（如休眠关键基因、硫代谢通路基因的时序性表达变化），同时动态追踪蒜氨酸、大蒜素等特征性风味物质的代谢轨迹，从分子和代谢层面揭示鲜蒜采后生理变化的内在机制，为构建精准保鲜技术提供理论依据。

3.1 转录组分析

转录组技术是指在细胞水平上对基因组进行高通量测序的技术，用于研究细胞中基因转录情况及转录调控规律，揭示了生物体细胞间的差异性[46,71]。Yang 等[72]基于 SLAF-seq 技术对 102 份鲜食大蒜种质进行转录组分析，揭示了不同品种大蒜在风味物质（如蒜氨酸）合成通路上的表达差异，为后续大蒜育种提供参考依据，借此可避免含病原菌的大蒜鳞茎。Modesti 等[73]研究发现紫皮大蒜与普通大蒜在硫代谢相关基因的表达水平存在显著不同，这与风味物质的形成息息相关。Lu 等[74]采用 RNA-seq 和 iTRAQ 技术对 4 ℃和 30 ℃下贮藏的大蒜进行转录组学分析，发现谷胱甘肽代谢、能量代谢（TCA 和 HMS 循环）和氨基酸代谢（半胱氨酸和蛋氨酸代谢）是低温致使大蒜发生青化现象的主要原因；Wu 等[46]采用转录组学技术检测出苯丙烷代谢途径中的关键酶（苯丙氨酸解氨酶（PAL 酶）、肉桂酸-4-羟化酶（CA4H 酶）、4-香豆酸-CoA 连接酶（4-CL 酶））和关键物质（苯丙氨酸、咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸）能够促进大蒜变绿。

3.2 代谢组分析

代谢组学是研究生物体内所有代谢物组成、结构和功能的科学，通过对代谢物的定量和定性分析，揭示生物体的代谢状态和功能变化[23]。Liu 等[75]通过采用代谢组学技术测定发现，贮藏温度和时间是影响蒜瓣组成和代谢产物含量的重要因素，在 22 ℃时蒜瓣的代谢谱发生显著变化，主要与发芽有关；Molino[76]通过 LC-MS 进行了风味代谢组分析，发现不同品种的大蒜中各风味物质和挥发性分子（如蒜氨酸）的含量不一致；刘建[77]采用代谢组技术分析不同品种大蒜的挥发性代谢物，从而进一步分析其特征组分，为不同大蒜贮藏时间。张华等[78]提出采用电喷雾内部萃取电离质谱技术（Internal Extraction Electrospray Ionization Mass Spectrometry，iEESI-MS）用于大蒜的检测，可以快速分析大蒜组织中的化学组分，同时可避免对大蒜中活性物质成分的破坏；采用气相-质谱联用技术（GC-MS）可以有效检测大蒜风味物质成分的含量[79]，还用于检测新鲜大蒜和黑蒜挥发性成分的区别[80]。代谢组分析技术在大蒜品质评价的应用有助于了解大蒜不同品质指标之间的相关性，同时可以通过检测代谢物之间的差异进而阐明大蒜在不同环境下贮存品质所发生的变化，这为大蒜后期的贮藏提供了技术支撑。

4 总结与展望

鲜蒜在贮藏过程中容易出现发芽、褐变、软化、风味劣变等现象，通过采取一定的技术手段对其进行保鲜，可以延缓其品质劣变速率，延长其货架期。但是，单一的保鲜方法虽在一定程度上保持鲜蒜的品质，但是无法同时兼顾在各个保鲜阶段的需求。比如，低温贮藏可以有效抑制蒜米腐烂变质，但可能对不耐低温的品种反而起适得其反的效果；气调法可以通过调节气体组成，降低大蒜的呼吸强度，维持其的硬度品质；涂膜法可以减少大蒜营养物质的损耗，但涂层破裂导致后续贮藏过程重量损失等问题。而低温、气调、涂膜技术的协同应用可弥补单一方法的不足，如“低温+气调+涂膜”组合既能综合保鲜，又能防止涂膜破裂引起的腐烂，若进一步与温度控制技术结合并引入互联网和智能控制系统，还可实现贮藏环境的精准温控，有效延长保鲜期。但多种保鲜技术结合可能会导致设备投入与运行成本较高，在产业规模化应用中受限，且不同的大蒜品种对低温等处理的耐受性差异显著，协同技术的参数优化需进一步针对性研究；由于应用于果蔬保鲜上的智能化不足，传统保鲜技术与智能温控、物联网系统的融合应用尚处于探索阶段，精准环境调控体系待完善。不过，对于多种技术结合带来的成本问题，随着科技的不断发展进步，应用于保鲜领域的材料成本逐渐降低，功能性包装材料的抑菌效果不断提升，未

来通过智能保鲜技术、生物技术与传统保鲜方法的深度结合使用，对于开发更加绿色、环保、低成本且具有显著保鲜效果的方法提供了有利条件，将有利于未来鲜蒜产业的发展，为其保鲜技术的发展提供有利支持。

参考文献

[1] 孙全敏,王严,王晓辉,等.大蒜汁对东北酸菜发酵中细菌菌群结构的影响[J].中国食品添加剂,2024,35(4):153-162.

[2] 万吉林.大蒜的主要化学成分及生理功能研究进展[J].现代食品,2022,28(21):10-14+21.

[3] SUNANTA P, KONTOGIORGOS V, PANKASEMSUK T, et al. The nutritional value, bioactive availability and functional properties of garlic and its related products during processing [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1142784.

[4] 王兆升,董海洲,刘传富,等.壳聚糖在蒜米涂膜保鲜中的应用研究[J].中国食品学报,2010,10(3):163-168.

[5] 吴天琦,张博然,顾晨程,等.供应链中低温耦合新型包装对大蒜保鲜的研究进展[J].食品安全导刊,2023,8:140-143.

[6] 方曙.复合过氧酸保鲜剂制备及对鸡肉品质的影响研究[D].南京:南京农业大学,2018.

[7] 吴延勇.不同处理对贮藏大蒜理化指标的影响[J].农产品加工,2023,18:55-57.

[8] 梁庆玲.大蒜鳞茎贮藏过程中品质和生理特性的变化[D].泰安:山东农业大学,2008.

[9] 李瑜,杨国浩.涂膜保鲜大蒜米技术研究[J].粮油加工,2009,2:118-120.

[10] 王子天,范硕,林榕姗,等.我国大蒜产业发展现状与展望[J].生物技术进展,2025,15(2):179-188

[11] DONG Y, FANG H, HOU Y, et al. Transcriptome analysis reveals differential gene expression in garlic aerial bulbs in response to gibberellin application [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2022, 41(7): 2967-2979.

[12] MOSTAFA H H A, WANG H, SONG J, et al. Effects of genotypes and explants on garlic callus production and endogenous hormones [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 4867.

[13] BEN Michael T E, FAIGENBOIM A, SHEMESH-MAYER E, et al. Crosstalk in the darkness: bulb vernalization activates meristem transition via circadian rhythm and photoperiodic pathway [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20: 1-16.

[14] 梁紫忆,杨凯丽,陈虔,等.大蒜采后解除休眠的基础和技术方法的研究进展[J].保鲜与加工,2023,23(8):70-75.

[15] 连毅,乔旭光,李燕,等.大蒜多酚氧化酶特性的研究[J].食品科学,2007,11:290-293.

[16] 杨文哲,王成龙,杨晴,等.温度对真空包装大蒜贮藏品质的影响[J].冷藏技术,2024,47(3):35-41.

[17] 郭媛丽.硅窗气调膜结合不同保鲜剂对鲜蒜贮藏期间品质的影响[D].晋中:山西农业大学,2019.

[18] QIU Z, LI L, ZHU W, et al. Pectins rich in RG-I and galactose extracted from garlic pomace: Physicochemical, structural, emulsifying and antioxidant properties [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109559.

[19] LU R, MA Y, WANG X, et al. Study of texture properties of 'laba'garlic in different color states and their change mechanisms [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(9): 4710-4721.

[20] QUE F, WANG G L, FENG K, et al. Hypoxia enhances lignification and affects the anatomical structure in hydroponic cultivation of carrot taproot [J]. Plant Cell Reports, 2018, 37(7): 1021-1032.

[21] 高佳,唐月明,朱永清,等.MAP 保鲜技术对采后干蒜贮藏品质的影响[J].西南农业学报,2020,33(7):1573-1579.

[22] 杜建灿,杨嵩明,杨正安,等.大蒜休眠期间生理指标变化及休眠控制方法研究进展[J].中国蔬菜,2011,16:9-14.

[23] 刘平香.基于代谢组学的大蒜生长贮藏过程中特征成分变化研究[D].北京:中国农业科学院,2020.

[24] LLAMAS D P, PATÓN L G, D ÍAZ M G, et al. The effects of storage duration, temperature and cultivar on the severity of garlic clove rot caused by *Fusarium proliferatum* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 78: 34-39.

[25] MENGERS H G, SCHIER C, ZIMMERMANN M, et al. Seeing the smell of garlic: Detection of gas phase volatiles from crushed garlic (Allium sativum), onion (Allium cepa), ramsons (Allium ursinum) and human garlic breath using SESI-Orbitrap MS [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133804.

[26] RAMIREZ D A, LOCATELLI D A, TORRES-PALAZZOLO C A, et al. Development of garlic bioactive compounds analytical methodology based on liquid phase microextraction using response surface design. Implications for dual analysis: Cooked and biological fluids samples [J]. Food Chemistry, 2017, 215: 493-500.

[27] 张斌.蒜米、蒜泥加工过程中品质变化规律及影响因素的研究[D].泰安:山东农业大学,2021.

[28] 王茂瑞.不同切割伤害程度对大蒜次生代谢物质合成的影响[J].食品研究与开发,2020,41(1):85-97.

[29] MASHAYEKHI K, MOHAMMADI Chiane S, MIANABADI M, et al. Change in carbohydrate and enzymes from harvest to sprouting

in garlic [J]. Food Science & Nutrition, 2016, 4(3): 370-376.

[30] SHARMA P, SHARMA S R, DHALL R K, et al. Physio-chemical behavior of γ-irradiated garlic bulbs under ambient storage conditions [J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 87: 101629.

[31] 张璇,何建中,李瑞军.辐照抑制冷藏大蒜发芽的研究[J].核农学报,2005,2:102-104.

[32] 谢宗传,陈忠海,邢小黑,等.辐照大蒜抑制发芽的敏感期试验[J].核技术,1999,12:775-778.

[33] 唐仕荣,马利华,毛雅雯.不同 O_2 分压对蒜米贮藏期品质影响的研究[J].中国调味品,2018,43(7):58-62.

[34] 朱君芳.气调贮藏对大蒜鳞茎贮藏效果与采后生理的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.

[35] HE Y, FAN G J, WU C E, et al. Influence of packaging materials on postharvest physiology and texture of garlic cloves during refrigeration storage [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125019.

[36] 赵春燕,王淑琴,刘诗阳,等.不同保鲜膜对嫩鲜蒜保鲜效果的影响[J].食品工业科技,2013,34(4):318-321+359.

[37] LIU H, XU L, YU F, et al. Effects of different ozone treatments on the storage quality and stability of fresh peeled garlic [J]. RSC Advances, 2021, 11(37): 22530-22543.

[38] 曹琳,郭训练,林春兰,等.臭氧处理对鲜剥大蒜致腐霉菌抑制效果研究[J].食品科技,2018,43(7):18-24.

[39] LI L, HU D, JIANG Y, et al. Relationship between γ-glutamyl transpeptidase activity and garlic greening, as controlled by temperature [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(3): 941-945.

[40] ZHANG B, QIU Z, ZHAO R, et al. Effect of blanching and freezing on the physical properties, bioactive compounds, and microstructure of garlic (*Allium sativum* L.) [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(1): 31-39.

[41] 黄浩楠,陈思蔚,孙月娥,等.涂膜协同低温冷藏对去皮大蒜保鲜效果的研究[J].农产品加工,2024,13:33-36+40.

[42] TORUN M, OZDEMIR F. Milk protein and zein coatings over peeled garlic cloves to extend their shelf life [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110571.

[43] CHEN D, ZHANG Y, ZHAO J, et al. Research progress on physical preservation technology of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Horticulturae, 2024, 10(10): 1098.

[44] 朱赛赛,张敏.温度激化处理对采后果蔬贮藏品质影响的研究进展[J].食品科学,2016,37(5):230-238.

[45] 孙毅,魏金凤,孙东.大蒜的贮藏原理及保鲜技术[J].食品工业科技,1989,3:34-37.

[46] WU J, NIU Z, LU X, et al. Transcriptome in combination proteome unveils the phenylpropane pathway involved in garlic (*Allium sativum*) greening [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 764133.

[47] HUANG Z, ZHOU Q, WU W L, et al. Thermal kinetics of enzyme inactivation, color changes, and allicin degradation of garlic under blanching treatments [J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(3): e12991.

[48] 茹志莹,陈芷雯,吴少福,等.冰温气调保鲜对鸡肉保鲜的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1213-1221.

[49] DAI O, WANG Y, LI M, et al. Post-harvest precooling technology and fresh-keeping mechanism of fruits and vegetables: A review [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 227: 113623.

[50] LU R, HOU W, ZHAO W, et al. New insights on low-temperature storage regulating garlic greening and the accumulation of pigment precursors via glutathione metabolism and energy cycles [J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135848.

[51] HE R, WANG Y, ZOU Y, et al. Storage characteristics of infrared radiation stabilized rice bran and its shelf-life evaluation by prediction modeling [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(6): 2638-2647

[52] FANG Y, WAKISAKA M. A review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies [J]. Agriculture, 2021, 11(10): 992.

[53] 于楠楠,孙玲,孙月娥.气调包装对大蒜贮藏品质的影响[J].科技视界,2022,21:19-22.

[54] 许建,何梅,贾凯,等.气调贮藏对大蒜鳞茎贮藏特性与品质的影响[J].保鲜与加工,2018,18(4):29-33+38.

[55] 罗丹,王珍珍,韩浩,等.低温结合不同硅窗面积气调包装保鲜对大蒜贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(17):367-374.

[56] LI Q, HU H, TAN X, et al. Effects of Storage in an Active and Spontaneous Controlled O2/CO2 Atmosphere on Volatile Flavor Components and the Microbiome of Truffles [J]. ACS Omega, 2024, 9(8): 9331-9347.

[57] 陈嘉琪,张耘梦,张黎明,等.不同包装方式对嫩鲜蒜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J].食品研究与开发,2021,42(20):28-34.

[58] ZHU K, WANG H, CHEN C, et al. Development of polyethylene antifogging and antibacterial packaging films for lettuce preservation [J]. LWT, 2023, 181: 114772.

[59] TZORTZAKIS N, CHRYSARGYRIS A. Postharvest ozone application for the preservation of fruits and vegetables [J]. Food Reviews International, 2017, 33(3): 270-315.

[60] ASLAM R, ALAM M S, SINGH S, et al. Aqueous ozone sanitization of whole peeled onion: Process optimization and evaluation of keeping quality during refrigerated storage [J]. LWT, 2021, 151: 112183.

[61] MUTHUVELU K S, ETHIRAJ B, PRAMNIK S, et al. Biopreservative technologies of food: An alternative to chemical preservation and recent developments [J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(10): 1337-1350.

[62] MA M, LIU Y, ZHANG S, et al. Edible coating for fresh-cut fruit and vegetable preservation: Biomaterials, functional ingredients, and joint non-thermal technology [J]. Foods, 2024, 13(23): 3937.

[63] NIE X, ZUO Z, ZHANG R, et al. New advances in biological preservation technology for aquatic products [J]. Npj Science of Food, 2025, 9(1): 15.

[64] 朱嘉晖,王顺民.壳聚糖-明胶活性膜处理大蒜片的工艺研究[J].中国果菜,2024,44(6):32-37.

[65] 李瑜,祝美云,庞凌云.大豆分离蛋白涂膜保鲜大蒜米技术研究[J].江苏农业科学,2009,2:231-232.

[66] BAE S H, LEE S W, KIM M R, et al. Influence of steeping solution and storage temperature on the color change of garlic [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): C108-C112.

[67] 胡传银,刘飞,张爱民.出口速冻蒜米加工新工艺研究与应用[J].食品科技,2015,40(2):78-81.

[68] REJANO L, SANCHEZ A H, DE CASTRO A, et al. Chemical characteristics and storage stability of pickled garlic prepared using different processes [J]. Journal of Food Science, 1997, 62(6): 1120-1123.

[69] 曹琳,张琪,张琦,等.壳聚糖涂膜结合不同包装方式对鲜剥大蒜的保鲜效果[J].食品科技,2018,43(1):37-42.

[70] LIU H, CHEN X, CHEN H, et al. Transcriptome and Metabolome Analyses of the Flowers and Leaves of *Chrysanthemum dichrum* [J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 716163.

[71] ZHAO L, ZHOU Y, QUAN S, et al. Transcriptome analysis reveals mechanisms of the disease resistance in postharvest kiwifruit induced by *Meyerozyma caribbica* [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 322: 112452.

[72] YANG J, SUN M, REN X, et al. Revealing the genetic diversity and population structure of garlic resource cultivars and screening of core cultivars based on specific length amplified fragment sequencing (SLAF-Seq) [J]. Genes, 2024, 15(9): 1135.

[73] MODESTI M, FERRI S, ALICANDRI E, et al. Unraveling genetic, compositional, and organoleptic traits of elephant garlic of different geographical origins [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140643.

[74] LU R, WANG X, ZHAO W, et al. Comparative transcriptome and proteome profiles reveal the regulation mechanism of low temperature on garlic greening [J]. Food Research International, 2022, 161: 111823.

[75] LIU P, WANG Y, XU Y, et al. Monitoring changes in biochemical and metabolite profiles in garlic cloves during storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(17): 10117-10126.

[76] MOLINO R J E J, RELLIN K F B, NELLAS R B, et al. Small in size, big on taste: Metabolomics analysis of flavor compounds from Philippine garlic [J]. Plos One, 2021, 16(5): e0247289.

[77] 刘建.基于代谢组学的大蒜品质评价研究[D].合肥:合肥工业大学,2018.

[78] 张华,朱亮,陈焕文.电喷雾内部萃取电离质谱直接分析蒜瓣组织的研究[J].分析化学,2014,42(11):1634-1639.

[79] 范波,王鹏,韩颖,等.基于智能感官和气质联用分析不同产地的蒜[J].中国调味品,2022,47(8):160-166.

[80] HUANG Y B, MENG F B, GONG C X, et al. Widely targeted metabolomics and flavoromics reveal the effect of Wickerhamomyces anomalus fermentation on the volatile and nonvolatile metabolites of black garlic juice [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140534.