

“微型”胡萝卜的抑菌及抑制白化保鲜技术研究进展

魏丽娜^{1*}, 冉胤德¹, 李秉恒¹, 杨华婷¹, 曾桥¹, 张雄彪², 王健康¹

(1. 陕西科技大学食品科学与工程学院, 陕西西安 710021)

(2. 陕西苏米秦食品有限公司, 陕西榆林 718199)

摘要: 最少加工处理 (Minimally Processed, MP) 果蔬是新鲜果蔬在经过分级清洗、去皮切分、保鲜包装等加工处理后仍具有新鲜感的制品。“微型”胡萝卜属于鲜切胡萝卜的代表, 具有外观小巧、口感脆甜、食用方便等特点。但是, “微型”胡萝卜在去皮、切分及贮藏过程中容易发生微生物污染、组织白化及失水等问题, 从而降低食用品质, 且易造成食源性致病菌污染。该文综述了基于抑菌、抑制白化对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜保鲜技术, 主要包括化学消毒剂处理、有机酸和乙烯抑制剂、涂膜处理、蒸汽和热水处理、微波处理、低温处理、冷等离子体、辐照、高压二氧化碳以及联合处理技术, 最后对“微型”胡萝卜保鲜的研究方向进行展望, 以期为同类鲜切果蔬的贮藏保鲜提供参考。

关键词: 鲜切胡萝卜; “微型”胡萝卜; 抑菌; 抑制白化; 保鲜

文章编号: 1673-9078(2025)03-414-425

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0917

Research Progress on Antibacterial and White-blush Inhibition Preservation Technology for Baby Carrot

WEI Li'na^{1*}, RAN Yinde¹, LI Bingheng¹, YANG Huating¹, ZENG Qiao¹, ZHANG Xiongbiao², WANG Jiankang¹

(1.School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

(2.Shaanxi Sumiqin Food Co. Ltd., Yulin 718199, China)

Abstract: Minimally Processed (MP) fruits and vegetables are fresh fruits and vegetables that remain fresh after graded washing, peeling and cutting, preservation and packaging. Baby carrots are representatives of fresh-cut carrots, which have the characteristics of being small in size, crisp, sweet, and convenient to be consumed. However, baby carrots are susceptible to microbial contamination, tissue whitening, and water loss during peeling, cutting, and storage, which decreases the edible quality and easily causes contamination by foodborne pathogenic bacteria. In this paper, we reviewed the preservation technologies for the inhibition of bacteria and white-blush of Baby carrot as a representative of fresh-cut carrots, including chemical disinfectant treatment, use of organic acid and/or ethylene inhibitor, coating treatment, steam and hot water treatment, microwave treatment, low-temperature treatment, cold plasma, irradiation, high-pressure carbon dioxide, and combination of treatment techniques. Finally, The research

引文格式:

魏丽娜,冉胤德,李秉恒,等. “微型”胡萝卜的抑菌及抑制白化保鲜技术研究进展[J].现代食品科技,2025,41(3): 414-425.

WEI Li'na, RAN Yinde, LI Bingheng, et al. Research progress on antibacterial and white-blush inhibition preservation technology for baby carrot [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 414-425.

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 榆林市市县联动重大专项项目 (2023-SXLD-5); 陕西科技大学校级课程思政项目 (PX-324399); 科技部高端外国专家引进计划项目 (G2022041012L)

作者简介: 魏丽娜 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬加工及保鲜, E-mail: weilina_sust@163.com

direction of Baby carrot preservation is prospected, to provide a reference for the storage and preservation of similar fresh-cut fruits and vegetables.

Key words: fresh-cut carrots; Baby carrot; bacteriostatic; inhibition of whitening blush; preservation of freshness

“微型”胡萝卜又称 Baby carrot 或者水果胡萝卜, 它是由成熟的长根形胡萝卜经过挑选, 去皮, 清洗, 切分成 5~6 cm 的短棒状胡萝卜, 然后经过消毒剂处理, 塑料袋包装销售^[1]。“微型”胡萝卜这一概念最早是在 1986 年由美国加利福尼亚胡萝卜种植者 MIKE 针对胡萝卜外观不良造成的原料浪费提出来的。随着“微型”胡萝卜的推出, 美国胡萝卜人均消费量大增。“微型”胡萝卜外观迷你、口感脆甜、低热量、高纤维及丰富的维生素含量深受少年儿童和健身人群的欢迎, 之后流行于西方的各个国家, 有着三分之一的鲜食市场。其价格约为普通胡萝卜的 2~3 倍, 经济效益良好。20 世纪 90 年代末, 我国从美国引进种植可以加工“微型”胡萝卜的胡萝卜新品种^[2], 2018 年陕西海升集团从德国引进全自动化水果胡萝卜生产加工等一系列机器, 生产出一款品牌名为枝纯的“微型”胡萝卜。2019 年江苏一号农场科技股份有限公司投建超 5 000 m² 的金坛智能沙拉工厂, 推出一款“吮指胡萝卜”的鲜食产品。国内胡萝卜市场需求逐渐向鲜食化和多元化转变^[3]。“微型”胡萝卜在鲜食、配餐及预制菜加工领域具有广阔的市场前景。

“微型”胡萝卜在被去皮和切分的过程中因受到机械损伤导致细胞内容物流出, 促进了微生物的生长繁殖, 从而降低了胡萝卜的整体营养品质和商业价值^[4]。关于包含“微型”胡萝卜在内的鲜切胡萝卜产品在生产及流通中都爆发过微生物污染和召回的案例, 在已知病因的爆发中, 包括蜡样芽孢杆菌、沙门氏菌、肉毒杆菌、志贺氏菌和单增李斯特菌。Grimmway 农场在 2021 年发布公告召回一些“微型”胡萝卜的产品, 原因是其受到了沙门氏菌的污染^[5]。2023 年 3 月份, 美国的 Fresh Ideation 食品集团因在环境样本检测出单增李斯特菌阳性, 从而召回了一些包含鲜切胡萝卜在内的产品^[6]。胡萝卜清洗过程中, 微生物会通过水作为主要载体造成污染。在去皮和切分过程中会有汁液的流出, 大肠杆菌和沙门氏菌等致病菌会通过流出的汁液进行大量繁殖。“微型”胡萝卜切割用的机械设备以及操作人员自身携带的微生物都是污染来源的关键^[7]。此外, 在切割及贮藏过程中, 由于“微型”胡萝卜组

织破损、脱水引起木质素相关酶: 苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Ammonia Lyase, PAL)、4- 香豆酸辅酶 A 连接酶 (4-Coumarate:CoA Ligase, 4CL) 和肉桂酸 4- 羟基化酶 (Cinnamate 4-Hydroxylase, C4H) 活性的改变^[8], 进而木质化的作用加剧, 造成胡萝卜组织萎蔫和脆度下降。在储藏过程逐渐失去明亮的橙色外观, 从而发生白化, 导致其食用品质受到影响。代谢组学分析发现白化主要成分由对羟基苯基木质素 (Phydroxyphenyl Lignin) 和愈创木基木质素 (Guaiacyl Lignin) 组成。转录组学分析发现白化与编码 O- 甲基转移酶、反式醇甲基转移酶、香柑醇 O- 甲基转移酶、咖啡酸 3-O- 甲基转移酶、苯丙氨酸解氨酶、阿魏酸 -5- 羟化酶、肉桂酸 4- 羟化酶咖啡酰辅酶 A-O- 甲基转移酶、5-O-(4- 香豆醇基)-D- 奎尼酸 3'- 单氧酶的基因表达有关^[9]。

针对包含“微型”胡萝卜在内的鲜切胡萝卜微生物污染和白化问题, 本文综述了近年来国内外以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜抑菌、抑制白化保鲜技术, 包括化学保鲜处理技术、热处理技术、非热处理技术以及联合处理技术。以期“微型”胡萝卜及预制菜等产品的保鲜技术提供参考。

1 化学保鲜处理技术

1.1 化学消毒剂清洗

清洗消毒是果蔬加工中非常重要的一步, 不同的清洗消毒方法可以有效减少微生物含量和农药残留, 驱除果蔬内部的虫体, 延长果蔬的贮藏期^[10]。目前含氯消毒剂是生产生活中最常见的化学消毒剂之一。1832 年, 在巴黎霍乱瘟疫中, 次氯酸钠溶液首次在人类瘟疫史上发挥了“消毒杀菌”的作用^[11]。我国卫生部印发的《次氯酸钠类消毒剂卫生质量技术规范》中表明用于果蔬清洗消毒的次氯酸钠溶液安全使用规范: 允许使用浓度 (以有效氯含量计) 为 100~200 mg/L 且作用时间不超过 10 min^[12]。1944 年, 二氧化氯首次作为消毒剂用于处理美国纽约州尼加拉大瀑布城的饮用水^[13]。二氧化氯是一种高效的气体含氯消毒剂, 其较强的氧化性可与微生物细胞内部分可溶性酶发生氧化还原反

应,破坏其结构,导致蛋白质合成受阻^[14]。美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)规定用做果蔬洗涤的消毒剂,用量以残留的二氧化氯量不超过 3 mg/kg 为限^[15]。Guan 等^[16]对接种了大肠杆菌 O157:H7 的“微型”胡萝卜用二氧化氯气体处理 60 min 后,大肠杆菌 O157:H7 在低输入(1 g ClO₂、400 g “微型”胡萝卜于 35 L 密闭容器)和高输入(6 g ClO₂、400 g “微型”胡萝卜于 35 L 密闭容器)条件下分别降低了 1.9 和 4.8 log CFU/mL。相同处理时间下,二氧化氯气体浓度与微生物减少量呈正相关,合理控制二氧化氯气体浓度可以达到高效的抑菌效果。但二氧化氯也存在一些缺点:爆炸性以及光照下容易分解。亚氯酸钠是一种固体含氯消毒剂,因其自身较强的氧化性具有抑菌效果。国内最早由化工部天津化工研究院在 20 世纪 70 年代采用电解法,用食盐水电解液吸收氯酸钠(NaClO₃)发生的二氧化氯制备出亚氯酸钠^[17]。美国 FDA 规定酸化的亚氯酸钠溶液用做蔬菜加工,浓度控制在 500~1 200 mg/kg^[15]。在允许使用的安全浓度范围内,亚氯酸钠溶液浓度与微生物减少量呈正相关。研究表明用浓度分别为 100、250 和 500 mg/L 的酸化亚氯酸钠溶液洗涤接种了大肠杆菌 O157:H7、沙门氏菌和单核增生李斯特菌的鲜切胡萝卜后,细菌计数分别降低 1、1.5 和 2.5 log CFU/g^[18]。含氯消毒剂因其成本低,使用方便及抑菌性好等优点被广泛地用于鲜切食品工业中。

虽然传统的含氯消毒剂可以有效的抑制微生物的生长,但是氯与食品中的有机物质反应产生具有潜在健康危害的消毒副产物(卤化物),且对产品的品质和风味产生影响^[19]。因此除了上述的一些含氯消毒剂清洗处理之外,开发出安全无残留的绿色消毒剂才是未来研究中的关键问题。20 世纪 80 年代德国拜耳(Bayer)公司研发出二甲基二碳酸盐(Dimethyl Decarbonate, DMDC),用于杀灭果酒中污染的霉菌和酵母^[20]。DMDC 可以改变微生物内部酶的活性从而抑制微生物的生长。2005 年我国卫生部新增 DMDC 为果汁饮料防腐剂,最大添加量为 250 mg/kg^[21]。Wang 等^[22]用 DMDC (200 mg/L)处理鲜切胡萝卜后,菌落总数、总酵母和霉菌数降低了 3.01 和 3.43 log CFU/g ($P < 0.05$)。此外,DMDC 在抑菌的同时维持了鲜切胡萝卜贮藏期间的维生素 C 和 β -胡萝卜素含量的水平。然而,DMDC 有轻微

刺激性气味且分解产物甲醇会对人体产生危害,当 DMDC 添加量低于 250 mg/kg 时分解产生的甲醇会被人体代谢,不会出现任何不适症状^[20]。臭氧(O₃)是一种强氧化剂和消毒剂,溶于水可形成臭氧水,臭氧水用于果蔬清洗具有很强的杀菌效果,臭氧水还可以降低鲜切果蔬的呼吸强度和营养物质损耗,延缓其劣变^[23]。与自来水清洗相比,臭氧水清洗能够抑制鲜切胡萝卜在贮藏过程中细菌菌落总数的增加且能减缓可溶性固形物、胡萝卜素和抗坏血酸含量的下降^[24]。目前国内在果蔬清洗方面还没有明确臭氧水安全使用的浓度范围。此外,不同消毒剂混合使用也可以有效的抑菌,Singh 等^[25]用百里香精油、二氧化氯/臭氧水或二氧化氯/水顺序洗涤处理“微型”胡萝卜,大肠杆菌 O157:H7 分别降低了 3.75 和 3.99 log CFU/g。传统含氯消毒剂和非热杀菌技术联合使用时抑菌效果更加明显。游离氯清洗联合紫外照射处理“微型”胡萝卜,联合处理对沙门氏菌的灭活效果均显著优于单一处理^[26]。

综上所述,二氧化氯气体和亚氯酸钠等传统含氯消毒剂具有较强的抑菌性,但会引起氯残留和产生消毒副产物(卤化物)等安全问题。与传统的含氯消毒剂相比,DMDC 和臭氧水作为安全无残留的绿色消毒剂可以用于鲜切果蔬的清洗消毒,然而 DMDC 要严格控制其使用浓度,臭氧水由于没有规范的安全使用标准,因此需要进一步安全性的评估,也可以参考在除果蔬以外其他食品领域的安全标准。例如广东省质量技术监督局规定在水产品加工过程中,臭氧水杀菌浓度一般控制在 0.5 mg/L~5 mg/L 之间,杀菌时间一般控制在 5~30 min 之间^[27]。多种消毒剂的混合处理会比单一处理的效果要好,不同消毒剂混合之后具有协同作用可以增强抑菌效果:臭氧具有强氧化性但效果不稳定,二氧化氯具有稳定的消毒效果但氧化能力较弱,二者协同使用可以优势互补增强抑菌效果。但有些消毒剂不能混合在一起使用:含氯消毒剂和乙醇反应会产生有毒的氯气。另外消毒剂与其他抑菌保鲜技术联合使用也可增强抑菌效果。

1.2 有机酸和乙烯抑制剂

有机酸作为一种抑菌剂和抗氧化剂,一方面可以抑制微生物的生长,另一方面可以抑制苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶以及过氧化物酶等酶的活性,进而防止鲜切果蔬发生褐变^[28]。目前在鲜切

胡萝卜中应用最多的有机酸是抗坏血酸和柠檬酸。Xylia 等^[29]研究发现用质量浓度为 1% 的抗坏血酸处理鲜切胡萝卜在 4 °C 贮藏条件下保存 9 d 后, 与对照组相比, 经抗坏血酸处理后的鲜切胡萝卜其外观橙色更明亮。此外, 抗坏血酸处理提高了鲜切胡萝卜的总酚含量和抗氧化活性。1-甲基环丙烯 (1-methylcyclopropene, 1-MCP) 是一种常用的乙烯抑制剂, 可以抑制果蔬经鲜切处理后乙烯的释放。同时作为一种化学保鲜剂延缓果蔬衰老, 保持其自身的硬度、脆度和颜色, 进而延长贮藏期。研究表明, 用 1 μ L/L 的 1-MCP 处理鲜切胡萝卜后, 苯丙氨酸解氨酶的活性受到抑制, 木质素含量降低, 木质化作用减弱, 从而抑制了胡萝卜的白化^[30]。综上所述, 有机酸和乙烯抑制剂可以抑制胡萝卜的白化。有机酸虽然可以抑制微生物的生长, 但单一的有机酸处理抑菌效果不佳, 后续需要和其他抑菌剂以及其他抑菌保鲜技术联合使用。

1.3 基于天然可食性涂膜的保鲜技术

涂膜作为一种安全、环保、成本低廉和操作简便的方法, 可用于新鲜果蔬的保鲜, 减少水分从果蔬表面流失, 增强果蔬硬度和保持果蔬原有鲜艳色泽, 还能阻隔外界微生物, 在食品工业中备受关注^[31]。目前用于胡萝卜保鲜的涂膜研究大多集中在基于多糖类的物质 (图 1), 对于以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜涂膜处理主要起到两方面的作用, 一方面可以抑制微生物生长 (表 1), 另一方面可以保持胡萝卜水分, 抑制白化。

壳聚糖是甲壳素脱乙酰而得到的多糖, 可抑制许多真菌和致病菌的生长。高分子量壳聚糖通常不能穿透致病菌的细胞膜和细胞壁, 其作为一种螯合剂, 防止营养物质从细胞外被吸收, 并改变细胞的通透性。低分子量壳聚糖可以穿透致病菌的细胞壁, 从而影响 DNA/RNA 或蛋白质的合成^[32]。研究表明质量浓度为 10 g/L 壳聚糖涂膜处理“微型”胡萝卜后在体积分数为 10% O₂ 和 10% CO₂ 的 MAP 包装贮藏, 贮藏期间大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的增长速度明显低于对照组, 并且胡萝卜的硬度明显高于对照组^[33]。壳聚糖膜除了具有抑菌效果外, 还具有通透性和阻水性, 能降低果蔬内部水分流失。胡萝卜在贮藏期间会消耗 O₂ 产生 CO₂, 在含有同等体积分数的 O₂ 和 CO₂ 包装内, 会逐渐形成一种低 O₂ 高 CO₂ 的气体状态, 这种状态会降低胡萝卜的呼吸强度。黄原胶是一种胞外微生物多糖, 因其特殊的增

稠和乳化稳定性质可作为膜成型剂。黄原胶基涂膜可以控制鲜切果蔬表面水分的损失, 保持鲜切果蔬贮藏期间的新鲜度。用含有葡萄糖酸钙、乳酸钙和维生素 E 混合的黄原胶涂膜处理去皮的“微型”胡萝卜, 在 2% 和 85% 相对湿度下储存三周, 有效的控制了“微型”胡萝卜表面的白化和脱水, 同时也改善了胡萝卜的颜色, 且不会影响本身的风味和脆度^[34]。去皮的“微型”胡萝卜缺乏维生素 E 和钙, 涂膜液中加入葡萄糖酸钙、乳酸钙和维生素 E 提升其营养价值。淀粉作为一种可生物降解的天然高分子多糖被广泛的用于涂膜保鲜, 但由于淀粉的机械性能和稳定性较差, 往往需要加入其他成分来改善膜的性能。Leiva 等^[35]用淀粉、麦麸、肉桂和姜黄精油组成的活性薄膜处理“微型”胡萝卜, 并在 25% 和 75% 的相对湿度下储存两周, 与未涂膜胡萝卜相比, 涂膜后胡萝卜的水分损失从 12.5 g/100 g 下降至 6.95 g/100 g。麦麸具有成膜性且对氧气和二氧化碳有良好的阻隔性, 在改善淀粉机械性能和稳定性的同时延缓胡萝卜组织失水。肉桂和姜黄精油有较强的抑菌性和抗氧化活性, 抑制胡萝卜贮藏期间的微生物生长, 延长其货架期。除此之外, 天然可食性植物凝胶类涂膜也可以抑制鲜切胡萝卜的白化。芦荟凝胶具有成膜性和生物降解性, 可作为一种安全环保的膜液用于果蔬保鲜。研究发现用质量浓度为 500 g/L 芦荟凝胶涂膜处理鲜切胡萝卜。结果表明, 贮藏期间延缓了白化, 处理后的样品显示出更高的酚类、类黄酮类和类胡萝卜素含量, 具有更高的抗氧化能力。此外, 用芦荟凝胶处理对胡萝卜的风味影响不大^[36]。涂膜处理还可以通过改善果蔬代谢来维持果蔬贮藏期间良好的感官品质。Yu 等^[37]研究发现羧甲基纤维素基液体石蜡包埋交联涂膜处理小白菜, 活性氧代谢分析发现涂膜处理增强了活性氧清除能力, 降低了 H₂O₂ 和丙二醛含量, 抑制了其水分流失。在贮藏后期, 涂膜处理通过调控抗坏血酸-谷胱甘肽循环和苯丙烷代谢等非酶促活性氧清除系统, 抵抗氧化损伤, 维持小白菜贮藏品质。胡萝卜采后仍保持旺盛的生理代谢 (呼吸代谢、能量代谢和活性氧代谢), 深入探究生理代谢机制, 研究具有针对性的涂膜技术用以改善胡萝卜生理代谢, 从而延缓其组织失水, 抑制白化。

综上所述, 可食性薄膜作为一种食品包装材料是食品运输、储存和保鲜的重要组成部分。基于壳聚糖和淀粉等多糖类物质可完全降解、价格低廉和

生物相容性等特点，在未来可利用其制备可降解包装材料来代替传统的塑料包装^[38]。此外，多糖类物质的高吸附能力为活性成分的掺入提供了可能，不同性质的纳米粒子、精油和多酚负载到薄膜中既可以改善膜的机械性能，又可以提高其抑菌性和抗氧化性^[39]。除了多糖类可食性薄膜外，蛋白质类物质如：大豆蛋白、胶原蛋白和乳清分离蛋白等制成的蛋白基可食性薄膜也被用于食品保鲜包装，蛋白质薄膜的独特结构使得其机械性能优于多糖薄膜。未来可以考虑将其用于以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜保鲜包装，延长其贮藏期。多年来涂膜处理技术不断创新，是目前用于果蔬保鲜研究中使

用最广泛的一类处理技术。但是涂膜技术却没有在食品产业中得到广泛的应用，主要有以下几方面的原因：其一，目前涂膜的研究大多集中在基于膜自身的功能特性，而消费着最关心的还是膜的成本以及膜自身的一些感官特性例如：颜色和气味；其二，涂膜的安全性有待进一步加强，目前国内没有针对于涂膜技术相关的安全规范标准以及相应的监管措施；其三，涂膜技术目前主要集中在特定果蔬的功能化应用，存在单一性，对于“微型”胡萝卜而言应该建立一套基于胡萝卜品种、采收加工、贮藏条件和包装运输等多因素涂膜处理技术的完整体系。

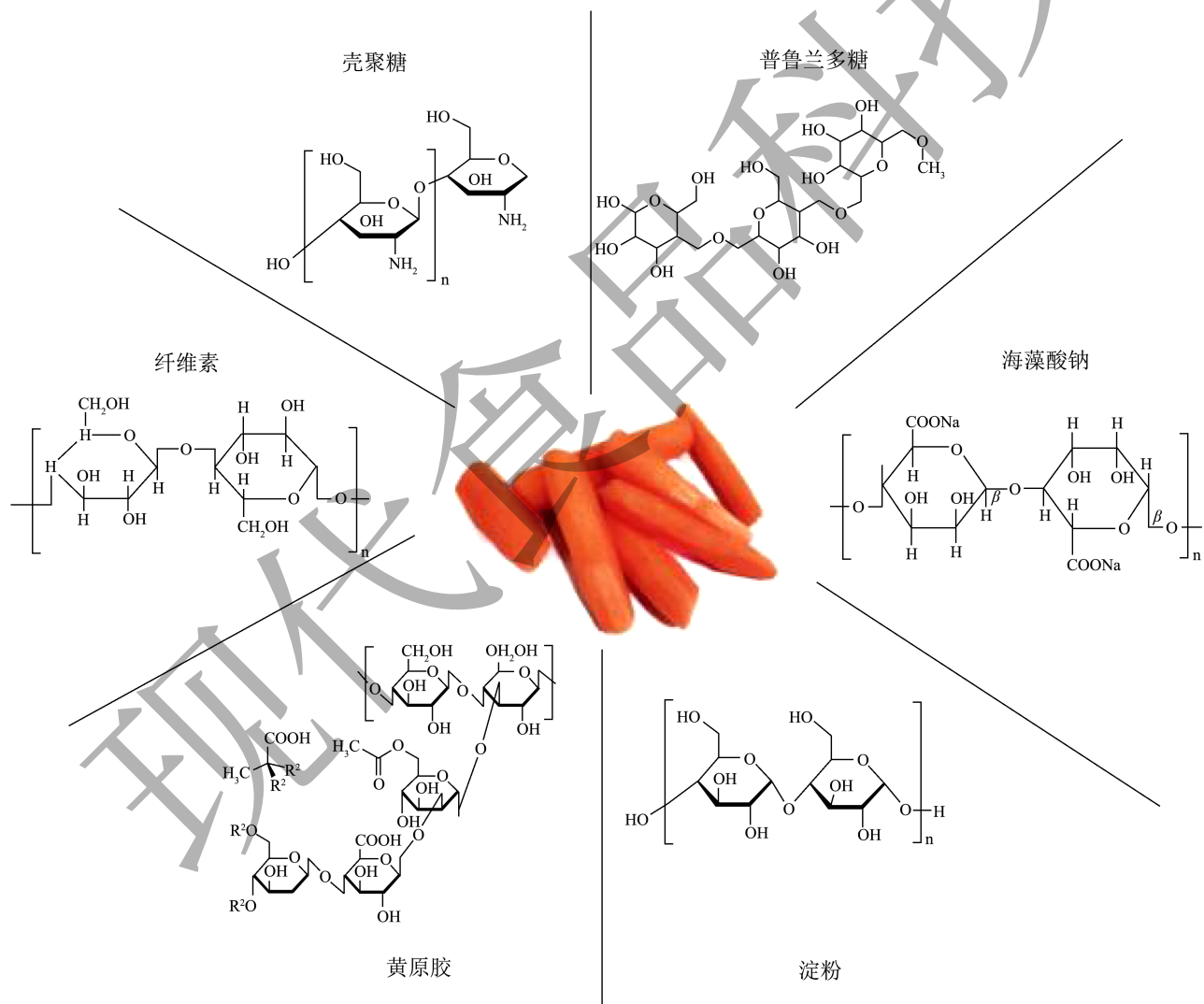


图 1 天然可食性多糖类物质对鲜切胡萝卜的涂膜保鲜

Fig.1 Fresh-cut carrots is coated with natural edible polysaccharides to preserve freshness

表 1 不同类型涂膜处理对鲜切胡萝卜的抑菌效果

Table 1 Bacteriostatic effect of different types of coating treatments on fresh-cut carrots

样品	薄膜类型	处理条件	微生物	效果	参考文献
“微型”胡萝卜	壳聚糖涂膜	质量浓度为 10 g/L 壳聚糖、体积分数为 10% O ₂ 和 10% CO ₂ 的 MAP 包装, 4 ℃ 贮藏 15 d	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	贮藏期间, 增长速度明显低于对照组	[33]
	含香菜精油的普鲁兰多糖薄膜	质量浓度为 100 g/L 香菜精油、质量浓度为 75 g/L 普鲁兰多糖、质量浓度为 15 g/L 甘油, 室温 7 d	黑曲霉和酿酒酵母	分别减少了 5 和 4 log CFU/g	[40]
	百里香精油、β-环糊精、壳聚糖涂膜	质量浓度为 20 g/L 壳聚糖、31.6 g/L 和 94.9 g/L 微胶囊化百里香精油、β-环糊精包含物, 4 ℃ 贮藏 12 d	酵母和霉菌	分别减少了 2.3 log CFU/g 和 3.5 log CFU/g	[41]
鲜切胡萝卜	果胶涂膜添加柠檬副产物提取物	体积分数为 1% 的柠檬副产物提取物、质量浓度为 20 g/L 的果胶, 4 ℃ 贮藏 14 d	菌落总数	菌落总数下降至 2.58 log CFU/g	[42]
	乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸与壳聚糖复合涂膜	质量浓度为 64 μg/mL 乳酸链球菌素和 250 μg/mL ε-聚赖氨酸以及 10 g/L 壳聚糖溶液, 4 ℃ 贮藏 9 d	假单胞菌、酵母和霉菌、金黄色葡萄球菌	与对照组相比, 无明显增长	[43]
	含银蒙脱土纳米颗粒 (Ag-MMT) 的海藻酸钠的涂膜	质量浓度为 0.1 g/L Ag-MMT、40 g/L 海藻酸钠溶液、50 g/L CaCl ₂ 溶液, 4 ± 1 ℃ 贮藏	肠杆菌科	始终低于该微生物组阈值 (10 ⁴ CFU/g)	[44]

2 物理保鲜处理技术

2.1 热处理技术

2.1.1 蒸汽和热水

热处理通过抑制微生物的生长来控制鲜切果蔬贮藏过程中的腐败变质, 热处理会使温度升高, 超过适宜微生物生长的温度, 微生物孢子和酶失活, 致病菌的营养细胞活性降低。采用适宜温度的热水处理鲜切果蔬, 不仅可以抑制微生物生长, 还能钝化酶的活性, 抑制褐变, 从而延长鲜切果蔬的货架期^[45]。采用中低温蒸汽处理 (50~100 ℃) 鲜切胡萝卜片, 当在 50~70 ℃ 下处理 600 s 时, 鲜切胡萝卜片的抑菌效果最明显, 可以有效的降低菌落总数, 处理温度及时间对其有显著影响, 温度越高, 所需时间越短^[46]。此外, 短时间的热水处理也会有明显的抑菌效果。用 80 ℃、1 min 热水处理鲜切胡萝卜有效降低了其表面的食源性致病菌 (鼠伤寒沙门氏菌和单增李斯特菌) 并且保持胡萝卜质量仍在可接受水平, 提高了鲜切胡萝卜的微生物安全性^[47]。热处理虽然可以杀灭一部分有害微生物, 但同时胡萝卜的质量品质也会受到影响, 导致胡萝卜的颜色、甜度和脆度的破坏以及一些营养物质 (Vc、类胡萝卜素) 的流失。研究表明, 在加热温度 (70~100 ℃)、

加热时间 (0~6 min) 下处理鲜切胡萝卜, 随着温度 and 时间的增加, 传统热处理比脉冲电场热处理更易发生白化和造成 β-胡萝卜素的减少^[48]。综上, 新鲜果蔬对热比较敏感, 短时间的热水或蒸汽处理可以抑制微生物的生长、减轻果蔬冷害的发生以及延缓由冷害引起的呼吸速率上升。但长时间高温的热水或蒸汽处理会对果蔬具有潜在的破坏性, 例如对“微型”胡萝卜的品质会造成一定损失, 尤其是水分的流失、硬度的下降、类胡萝卜素和 Vc 含量的减少。合理控制加热时间和加热温度会在一定程度上减少该损失。

2.1.2 微波处理

微波作为一种新型的热加工技术, 可以增强耐热微生物的灭活效果, 缩短加热时间, 提高加热效率, 与传统的加热方法相比, 对食品的感官品质影响较小^[49]。微波处理是在微波热效应和生物效应共同作用下, 微生物的细胞膜和细胞壁被破坏^[50], 进而细胞内的酶失去活性, 蛋白质变性, 活性物质损失, 最后微生物死亡。900 W 和 750 W 微波处理鲜切胡萝卜 45 s 和 60 s, 并在 5 ℃ 下保存 7 d, 微波处理使初始微生物量减少了约 1 log CFU/g^[51]。微波与传统的巴氏杀菌相比, 在同等的杀菌效果下微波热处理的能耗更低。研究表明用不同功率的微波处理接种了粪肠球菌和金黄色葡萄球菌的鲜切胡萝卜

卜, 在 400 W、65 s 的条件下, 粪肠球菌和金黄色葡萄球菌的灭活率分别为 26.2% 和 16.3%, 最后微波热处理的能耗比传统的蒸汽表面巴氏杀菌法降低了 52.3%^[52]。微波热处理虽然可以在更高的加热效率下抑制微生物的生长, 但也会造成胡萝卜组织脱水^[51]。微波热处理技术需要和其他保鲜技术联合处理来缓解热处理对“微型”胡萝卜品质的破坏。研究表明 360 W 微波热烫 300 s 结合高氧气调包装(体积分数 80% O₂、10% CO₂、10% N₂)能够有效抑制胡萝卜中微生物的生长且降低了储藏期内胡萝卜中 β -胡萝卜素的降解、硬度的损失和过氧化物酶的活性^[53]。

综上所述, 热处理是一种可以抑制微生物生长且无化学残留、安全性高的物理保鲜技术, 但对于“微型”胡萝卜这类鲜食食品会造成硬度下降和水分的损失。微波热处理技术是替代传统热处理的可行方案, 它既可以提高加热的效率, 又可以将加热对胡萝卜品质的损害降到最小。未来可以通过不断优化微波处理参数从而达到最大抑菌率和最小品质损失率。热处理技术需要和其他保鲜处理技术结合起来进而缩短加热时间、避免热伤害。

2.2 非热处理技术

非热处理技术包括低温处理、冷等离子体、辐照、高压二氧化碳和超声, 与传统的热加工处理技术相比, 在抑菌的同时对食品的品质产生的影响较小^[54]。目前, 对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜的抑菌保鲜应用最多的非热技术是冷等离子体、辐照、高压二氧化碳。此外, 这些非热处理技术和其他技术的联合使用可以达到更好的抑菌效果。

2.2.1 低温保鲜

低温保鲜是目前使用最广泛、效果最显著的一类鲜切果蔬保鲜技术。在低温状态下, 果蔬的呼吸强度减弱, 酶活性降低, 生理生化反应速率延缓^[28]。此外, 低温会影响微生物的活性, 抑制其生长繁殖。谢佳妮等^[55]研究发现在 4 °C 和 8 °C 贮藏条件下, 鲜切胡萝卜表面的霉菌、酵母菌以及菌落总数的增长速度明显低于在 20 °C 贮藏条件下的。与 8 °C 与 20 °C 相比, 4 °C 贮藏延缓了表面白化, 降低了鲜切胡萝卜的呼吸作用, 保持了鲜切胡萝卜的硬度, 延长了其贮藏期。目前市场上陕西海升集团生产的枝纯牌“微型”胡萝卜以及济南琥萃农业有限公司生产的贝蓓芯牌“微型”胡萝卜从入料、清洗、分级挑选到去皮切割等全过程低温冷链控制,

最大程度的保持胡萝卜的脆甜口感和明亮的橙色外观。但单一的低温处理对“微型”胡萝卜抑菌效果不够显著, 且仅仅停留在胡萝卜表面天然微生物的研究, “微型”胡萝卜在流通过程中可能会受到各种微生物的污染, 例如沙门氏菌、单增李斯特菌等一些食源性致病菌的污染。因此, 低温保鲜要与其他抑菌保鲜技术联合使用才能最大程度上保证“微型”胡萝卜在流通过程中的安全性, 延长其货架期。

2.2.2 冷等离子体

冷等离子体是一种新型的绿色非热加工技术, 被广泛的应用于果蔬和肉类保鲜、淀粉改性、乳制品加工和食品包装等食品工业中^[56]。等离子体产生各种活性物质与微生物细胞相互作用, 微生物细胞膜破损, 细胞内容物泄漏, 蛋白质与脂类物质被降解, 导致 DNA 或 RNA 生理活性受到影响, 微生物细胞的代谢受阻^[57]。由于它具有去污和杀菌的特性, 因此可以延长鲜切果蔬的保质期^[58]。此外, 冷等离子体技术的处理电压和处理时间是影响抑菌效果的关键因素, 通过不断优化冷等离子体技术的处理电压和处理时间可以得到最佳的抑菌效果。用常压冷等离子体可以有效杀死胡萝卜表面的金黄色葡萄球菌, 且当处理电压为 170 V, 处理时间为 5 min, 处理极距为 2.5 cm, 此时杀菌率可高达 92.35%。并且处理后较好的保持了胡萝卜的水分、糖度、酸度和颜色^[59]。研究发现 100 kV 的冷等离子体处理鲜切胡萝卜, 在冷藏温度下最低限度加工的鲜切胡萝卜原始微生物数量减少 2.1 log CFU/g, 且在 80~100 kV 的电压和 4~5 min 的处理时间下腐败菌的减少量最大^[60]。冷等离子技术在抑菌的同时也可以抑制胡萝卜白化。在 60 kV 的冷等离子体下对鲜切胡萝卜处理 5 min 并在 10 °C 下贮藏 72 h, 发现冷等离子体处理可抑制鲜切胡萝卜过氧化物酶活性的升高及木质素的积累, 延缓白化的发生, 同时显著抑制微生物的生长, 保持较高的抗坏血酸和总胡萝卜素含量^[61]。综上所述, 冷等离子技术作为一种冷杀菌技术可以用于以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜达到抑菌保鲜的效果。

2.2.3 辐照

食品辐照技术已被研究证明可以有效抑制微生物的生长, 减少食源性疾病发生。食品辐照技术主要分为电离辐照技术和非电离辐照技术两大类, 不同类型的辐照技术适用于各类果蔬的抑菌保鲜^[62]。

电离辐照具有波长短、效率高和能量高的特点,其中 γ 射线辐照作为电离辐照的一种被广泛的用于果蔬保鲜, γ 射线具有很强的穿透性,可以直接破坏微生物内部的DNA、RNA和蛋白质从而导致微生物死亡^[63]。用1 kGy剂量的 γ 辐照处理“微型”胡萝卜后在5℃的储存条件下,“微型”胡萝卜表面上的沙门氏菌减少了4.3 log CFU/g,在20℃的储存条件下,表面的沙门氏菌减少了3.7 log CFU/g。此外, γ 射线辐照还可以在在一定程度上抑制胡萝卜白化^[64]。研究表明 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线有效地阻止了酶促褐变反应的进行,并一定程度上抑制组织木质化。1.5~2.0 kGy剂量的辐照有利于类胡萝卜素及色泽的保持^[65]。虽然辐照技术能够有效地控制胡萝卜表面的微生物生长,但是辐照所产生的异味会对“微型”胡萝卜的感官品质造成影响,后续要和其他保鲜技术联合使用,以期降低使用剂量和减少辐照残留的异味。

紫外线(Ultraviolet, UV)是一种波长在100~400 nm的非电离辐照,按波长可分为UV-C(100~280 nm)、UV-B(280~315 nm)、UV-A(315~400 nm)^[66]。目前,对于鲜切胡萝卜保鲜使用最多的是UV-C。研究表明用短波紫外线(UV-C)处理鲜切胡萝卜,与对照组相比,随着贮藏时间的延长,2 kJ/m²的UV-C明显可以抑制菌落总数的增长^[67]。脉冲光(Pulsed Light, PL)作为一种新型的非热物理技术,在短时间内比紫外线有更高的抑菌效率。对鲜切胡萝卜接种稀释的酵母分散液,然后用高强度脉冲白光处理,最后用1.4 J/cm²的脉冲光束杀死了大部分酵母细胞^[68]。综上所述,目前单一的紫外线和脉冲光技术虽然对鲜切胡萝卜有较好的抑菌效果,但是对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜加工与贮藏过程中的白化现象以及其它品质变化的影响研究较少。

2.2.4 高压二氧化碳

高压二氧化碳(High Pressure Carbon Dioxide, HPCD)是一种冷杀菌技术,在5~50 MPa压力下向密闭容器中通入二氧化碳气体,产生一种高压和厌氧的环境来抑制微生物的生长^[69]。研究人员对鲜切胡萝卜接种大肠杆菌,并在压力(6、8、10和12 MPa)和温度(26℃和35℃)两种条件下用高压二氧化碳(HPCD)处理,结果表明在26℃,高压8 MPa下,25 min大肠杆菌减少约7 lg CFU/g,而在高压12 MPa下,大肠杆菌减少7 lg CFU/g仅需10 min^[70]。此外,高压技术对自然条件下鲜切胡

萝卜表面的微生物有抑制作用,研究人员用高压二氧化碳技术探究其对鲜切胡萝卜表面天然微生物的影响,结果发现在5 MPa和20℃下处理20 min,好氧菌减少1.86 lg CFU/g,霉菌和酵母菌减少了1.25 lg CFU/g^[71]。目前,高压二氧化碳技术虽然可以抑制胡萝卜表面微生物的生长与繁殖,但对胡萝卜的质地会造成一定影响,研究表明在12 MPa,40℃,15 min条件下对鲜切胡萝卜进行HPCD处理,与对照组相比胡萝卜的硬度下降86%^[72]。因此需要和其他技术结合使用来减缓其对胡萝卜质地的影响。

综上,与热处理技术相比,非热处理技术可以在抑菌的同时最大程度的维持以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜的品质。但等离子体处理技术存在效率低、成本高的问题;辐照技术抑菌效果明显,但会产生异味且对胡萝卜白化现象的影响研究较少;高压二氧化碳处理后胡萝卜的质地会发生变化。因此,需要不断深入探究其他新型非热处理技术对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜的保鲜。

3 联合处理技术

非热加工技术之间以及非热加工技术与其他保鲜技术联合使用也被广泛的应用于果蔬保鲜中,联合处理可以增强对微生物的抑制或致死作用,提高了较低单独处理强度下的食品保存能力^[73]。目前关于以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜的联合处理技术主要集中在辐照、高压处理和超声,可以对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜起到不同的抑菌效果(表2),同时联合处理后的胡萝卜的保水性和延缓白化效果更好。研究发现先用2 kJ/m² UV-C辐照处理鲜切胡萝卜后,再用高氧气调包装(MAP,体积分数为80% O₂、10% CO₂和10% N₂) 在4℃下贮藏。UV-C和MAP协同作用增强了鲜切胡萝卜贮藏期间的抗菌活性,减少脱水、抑制丙二醛积累和抑制酚类代谢相关酶活性及其基因表达,缓解了胡萝卜木质素沉积和表面白化^[74]。鲜切芦笋和“微型”胡萝卜类似在贮藏过程也会发生组织失水进而导致木质化。研究发现采用频率为40 kHz,功率为360 W的超声,以复合清洗剂(质量浓度为1%柠檬酸、质量浓度为0.02%乳酸链球菌素)为超声媒介处理鲜切芦笋15 min,再用浓度为2 500 $\mu\text{L/L}$ 的肉桂精油熏蒸处理4 h,最后用1 $\mu\text{L/L}$

的 1-MCP 处理转移至保鲜袋中进行气调包装（体积分数为 10% O₂ 和 15% CO₂）。结果表明，相比对照组联合处理有效延缓鲜切芦笋木质化进程，使 PAL 和 POD 活性分别下降了 57.84% 和 50.76%，木质素含量降低了 55.27%，并且维持了较好的色泽和感官品质^[75]。

表 2 联合处理技术对鲜切胡萝卜抑菌保鲜效果
Table 2 Bacteriostatic preservation of fresh-cut carrots by combined treatment technology

样品	处理方式	处理条件	效果	参考文献
鲜切胡萝卜	高压二氧化碳和高功率超声	高压二氧化碳 10 MPa, 超声 10 W	3 min 后大肠杆菌减少 8 lg CFU/g	[72]
鲜切胡萝卜	超声和表面活性剂	超声 (40 kHz, 30 W/L) 0.1% Tween 20	5 min 后胡萝卜表面的蜡样芽孢杆菌减少了 2.22 lg CFU/g	[77]
鲜切胡萝卜	γ 辐照和含有纳米乳液 (柑橘提取物、蔓越莓汁和精油组成) 的酪蛋白酸钙涂膜	0.5 kGy 的 γ 辐照	菌落总数、酵母和霉菌的计数显著降低	[78]
鲜切胡萝卜	超声和柠檬醛纳米乳剂	超声 (20 kHz, 345 W/cm ²)、0.15 mg/mL 柠檬醛纳米乳剂	9 min 后福氏志贺氏菌减少 8.55 lg CFU/mL	[79]
“微型”胡萝卜	γ 辐照、乳酸链球菌素和香芹酚精油	1.0 kGy 的 γ 辐照	鼠伤寒沙门氏菌完全杀灭至检出限以内	[80]

综上所述，辐照处理有较好的抑菌效果，但需要联合其他保鲜处理技术来缓解辐照产生的异味和抑制胡萝卜白化；高压和超声均具有一定的抑菌性，将二者联合起来使用可以增强抑菌效果，在超声的媒介中加入柠檬酸或抗坏血酸等可以维持胡萝卜明亮的橙色外观；辐照、高压和超声处理之后使用涂膜技术，最后进行气调包装可以在抑菌的同时最大程度维持胡萝卜的感官品质，延长其货架期。冷等离子体也是一种抑菌性强的非热处理技术，可以将冷等离子体和涂膜处理技术联合使用用于“微型”胡萝卜的抑菌保鲜。等离子体活化水（Plasma Activated Water, PAW）是由冷等离子体处理得到的一种无化学物质，绿色安全的新型消毒剂^[76]。未来 PAW 可用于“微型”胡萝卜的清洗消毒，联合可食性涂膜和气调包装达到最佳的保鲜效果。联合处理

技术弥补了单一处理技术对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜在较强的抑菌效果下但对其感官品质造成损失的缺陷，在增强了抑菌效果的同时较好的维持了胡萝卜 Vc、β-胡萝卜素含量及硬度等品质的水平，延缓了胡萝卜组织失水进而抑制了白化现象的发生。

4 结论与展望

本文主要总结了化学清洗消毒剂、有机酸和乙烯抑制剂、以天然可食性成分为基材的单一或者复合涂膜、蒸汽或热水、微波、低温保鲜、冷等离子体、辐照、HPCD 以及非热联合处理等技术对以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜抑菌和抑制白化作用。目前，在化学处理技术中：探索安全无残留的绿色消毒剂才是用于“微型”胡萝卜清洗消毒的最佳选择。以天然可食性成分为基材的单一或者复合涂膜是目前使用最广泛的“微型”胡萝卜保鲜技术，在抑制微生物生长与繁殖的同时可以抑制其白化；热处理技术虽然可以起到较好的抑菌效果，但会造成胡萝卜水分的损失和硬度的下降，要合理控制加热温度和时间；相较于热处理技术而言，非热处理技术有更强的抑菌性且对“微型”胡萝卜贮藏过程中营养品质影响不大，但是不同的单一非热处理技术也会存在一些不足：低温处理抑菌效果不佳、辐照处理会产生异味、高压会造成胡萝卜硬度的下降。因此需要深入探究不同非热处理技术的作用机理，多种非热技术之间以及非热技术和涂膜保鲜联合使用会对“微型”胡萝卜在抑菌和抑制白化的同时将其营养品质损失降至最低。物理保鲜处理技术结合可食性涂膜在抑菌的同时抑制胡萝卜白化，延长其贮藏期。将生物抑菌保鲜剂：乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸加入膜液中涂膜处理实现生物与化学保鲜技术的联合使用从而增强抑菌效果。

关于“微型”胡萝卜的抑菌保鲜在目前的研究基础上还有一些不足，未来的研究需要不断改进，主要体现在以下几个方面：（1）目前关于“微型”胡萝卜的保鲜大多集中在化学和物理处理保鲜技术。未来可以考虑将更加天然安全的生物保鲜技术用于“微型”胡萝卜保鲜研究，例如将一些微生物拮抗菌：枯草杆菌素、溶菌酶和乳酸链球菌素等用于“微型”胡萝卜的抑菌保鲜。（2）目前关于“微型”胡萝卜的包装形式较为单一，保质期较短。未来“微型”胡萝卜的包装保鲜可以参考其他鲜切

果蔬的包装,例如含有纳米颗粒的纳米复合包装膜以及真空包装。此外还可以通过调节包装内的气体比例,不断探索新型的包装材料对“微型”胡萝卜包装保鲜,进而延长其货架期。(3)包含以“微型”胡萝卜为代表的鲜切胡萝卜抑菌保鲜技术大多是基于接种于胡萝卜表面的固定微生物,然而从农场到餐桌的整个过程(farm-to-table),胡萝卜可能会被各种各样的微生物直接或间接污染。未来要注重对“微型”胡萝卜从生产,流通到贮藏全产业链中微生物的研究,最大程度上减少“微型”胡萝卜微生物污染和召回案例的发生。(4)白化是影响胡萝卜在后期加工与贮藏过程中品质变化的重要因素之一,未来要不断深入研究胡萝卜发生白化的生理和分子机制,深入分析“微型”胡萝卜组织细胞结构,采用代谢组、基因组和转录组等组学研究技术分析胡萝卜白化的原因,进而为“微型”胡萝卜白化现象的防治提供依据。

参考文献

- [1] SIMOES A D, MOREIRA S I, DA COSTA F B, et al. Populational density and harvest age of carrots for baby carrot manufacture [J]. Horticultura Brasileira, 2010, 28(2): 147-154.
- [2] 庄飞云,胡鸿,方智远. “微型”胡萝卜(Baby carrot)概念来源及市场发展前景[J]. 中国蔬菜, 2007, 3: 43-44.
- [3] 王淳. 鲜食胡萝卜品种引进及肉质根的相关研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [4] GIANNAKOUREOU M C, TSIRONI T N. Application of processing and packaging hurdles for fresh-cut fruits and vegetables preservation [J]. Foods, 2021, 10(4): 830.
- [5] FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. Grimmway farms voluntarily recalls certain retail-packaged carrots due to potential salmonella contamination [EB/OL]. (2021-07-21) [2023-11-15]. <https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/grimmway-farms-voluntarily-recalls-certain-retail-packaged-carrots-due-potential-salmonella>.
- [6] FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. Fresh ideation food group LLC recalls sandwiches and other products because of possible health risk [EB/OL]. (2023-02-03) [2023-11-16]. <https://www.fda.gov/safety/recalls-market-withdrawals-safety-alerts/fresh-ideation-food-group-llc-recalls-sandwiches-and-other-products-because-possible-health-risk>.
- [7] 陈岩,徐学万,杨慧,等. 鲜切蔬菜微生物污染来源及控制措施研究[J]. 农产品质量与安全, 2017, 6: 76-81.
- [8] BARROS J, SERK H, GRANLUND I, et al. The cell biology of lignification in higher plants [J]. Annals of Botany, 2015, 115(7): 1053-1074.
- [9] CHEN C C, WANG Y, XU L, et al. Characterization of abscisic acid and ethylene in regulating the white blush in fresh-cut carrots [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(21): 12788.
- [10] 魏丽娜,吴玉茜,张艳,等. 表面不规则的难清洗果蔬清洗技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 175-183.
- [11] 陈荣达,张莹. 含氯消毒剂次氯酸钠发展史[J]. 化学教育(中英文), 2021, 42(5): 25.
- [12] 卫生部卫生监督司. 次氯酸钠类消毒剂卫生质量技术规范[S]. 中华人民共和国卫生部, 2007.
- [13] 龚宇同. 二氧化氯在食品工业中的应用[J]. 农业新技术, 2004, 5: 7-8.
- [14] 薛伟,姚晨之. 化学消毒剂作用机理及检测[J]. 中国洗涤用品工业, 2020, Z1: 116-121.
- [15] FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. Food Additive Status List [EB/OL]. (2024-07-2) [2024-09-15]. <https://www.fda.gov/food/food-additives-petitions/food-additive-status-list>.
- [16] GUAN J W, LACOMBE A, TANG J M, et al. Use of mathematic models to describe the microbial inactivation on baby carrots by gaseous chlorine dioxide [J]. Food Control, 2021, 123: 107832.
- [17] 黄云翔. 亚氯酸钠生产概况及其展望[J]. 广东化工, 1997, 6: 15-17.
- [18] RUIZ-CRUZ S, ACEDO-FELIX E, DIAZ-CINCO M, et al. Efficacy of sanitizers in reducing *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* populations on fresh-cut carrots [J]. Food Control, 2007, 18(11): 1383-1390.
- [19] PETRI E, VIRTO R, MOTTURA M, et al. Comparison of peracetic acid and chlorine effectiveness during fresh-cut vegetable processing at industrial scale [J]. Journal of Food Protection, 2021, 84(9): 1592-1602.
- [20] 郭换丽,余元善,吴继军,等. 二甲基二碳酸盐的研究进展及其在食品杀菌中的应用[J]. 广东农业科学, 2015, 42(4): 71-76.
- [21] GB 2760-2024, 食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S].
- [22] WANG C, CHEN Y L, XU Y J, et al. Effect of dimethyl dicarbonate as disinfectant on the quality of fresh-cut carrot (*Daucus carota* L.) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013, 37(5): 751-758.
- [23] 邓朝阳,王锋,苏小军,等. 臭氧在鲜切果蔬加工中的应用[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 184-189.
- [24] 宋遵阳,徐云峰,关惠,等. 臭氧水对鲜切胡萝卜贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 326-329.
- [25] SINGH N, SINGH R K, BHUNIA A K, et al. Efficacy of chlorine dioxide, ozone, and thyme essential oil or a sequential washing in killing *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce and baby carrots [J]. Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology, 2002, 35(8): 720-729.

- [26] GUO S H, HUANG R Z, CHEN H Q. Application of water-assisted ultraviolet light in combination of chlorine and hydrogen peroxide to inactivate *Salmonella* on fresh produce [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 257: 101-109.
- [27] 广东省地方标准.DB44/T 951-2011,水产品加工过程臭氧及过氧化氢使用准则[S].广东:广东省质量技术监督局,2011.
- [28] 赵海云,邵林,李涛,等.鲜切果蔬保鲜技术的研究进展[J].农产品加工,2023,10:81-90.
- [29] XYLIA P, CLARK A, CHRYSARGYRIS A, et al. Quality and safety attributes on shredded carrots by using *Origanum majorana* and ascorbic acid [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 155: 120-129.
- [30] 汤尧,李朝哲,刘春雨,等.1-MCP协同活性炭处理抑制鲜切胡萝卜木质化形成研究[J].西华大学学报(自然科学版),2024,43(4):44-52.
- [31] 周涵梦,黄金发,马辉,等.可食性涂膜在鲜切果蔬保鲜中的研究进展[J].中国果菜,2021,41(7):7-14,28.
- [32] KE C L, DENG F S, CHUANG C Y, et al. Antimicrobial actions and applications of chitosan [J]. Polymers, 2021, 13(6): 904.
- [33] LECETA I, MOLINARO S, GUERRERO P, et al. Quality attributes of map packaged ready-to-eat baby carrots by using chitosan-based coatings [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 142-150.
- [34] MEI Y, ZHAO Y, YANG J, et al. Using edible coating to enhance nutritional and sensory qualities of baby carrots [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(5): 1964-1968.
- [35] LEIVA A F R, HERNANDEZ-FERNANDEZ J, TORO R O. Active films based on starch and wheat gluten (*Triticum vulgare*) for shelf-life extension of carrots[J]. Polymers, 2022, 14(23): 5077.
- [36] LEON A, LOGIOGARAY V, CASAJÚS V, et al. Effect of aloe vera gel coating on organoleptic and nutritional quality of minimally processed carrot [J]. Food Science and Technology International, 2023, 10820: 132231199509.
- [37] YU K B, ZHOU L, XU J, et al. Carboxymethyl cellulose-based water barrier coating regulated postharvest quality and ROS metabolism of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185: 111804.
- [38] MOHAMED S A A, EL-SAKHAWY M, EL-SAKHAWY M A M. Polysaccharides, protein and lipid -based natural edible films in food packaging: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 238: 116178.
- [39] POPYRINA T N, DEMINA T S, AKOPOVA T A. Polysaccharide-based films: from packaging materials to functional food [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2023, 60(11): 2736-2747.
- [40] GNIEWOSZ M, KRASNIEWSKA K, WORETA M, et al. Antimicrobial activity of a pullulan-caraway essential oil coating on reduction of food microorganisms and quality in fresh baby carrot [J]. Journal of Food Science, 2013, 78(8): M1242-M1248.
- [41] VIACAVA G E, CENCI M P, ANSORENA M R. Effect of chitosan edible coatings incorporated with free or microencapsulated thyme essential oil on quality characteristics of fresh-cut carrot slices [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(4): 768-784.
- [42] IMENEO V, PISCOPO A, MARTIN-BELLOSO O, et al. Efficacy of pectin-based coating added with a lemon byproduct extract on quality preservation of fresh-cut carrots [J]. Foods, 2022, 11(9): 1314.
- [43] SONG Z Y, LI F, GUAN H, et al. Combination of nisin and epsilon-polylysine with chitosan coating inhibits the white bluish of fresh-cut carrots [J]. Food Control, 2017, 74: 34-44.
- [44] COSTA C, CONTE A, BUONOCORE G G. Calcium-alginate coating loaded with silver-montmorillonite nanoparticles to prolong the shelf-life of fresh-cut carrots [J]. Food Research International, 2012, 48(1): 164-169.
- [45] 张晓芳,胡文忠,刘程惠,等.清洗技术对鲜切果蔬微生物与品质影响的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(13): 336-342.
- [46] 周明晖,刘书来,丁玉庭.中低温蒸汽处理对鲜切胡萝卜片减菌效果及其品质的影响[J].食品工业科技,2012, 33(1):72-76.
- [47] 张甜甜.鲜切胡萝卜和鲜切黄瓜食源性致病菌控制技术研究[D].泰安:山东农业大学,2013.
- [48] WANG L, LI Z H, LIU D, et al. Effect of heat and pulsed electric field treatment on the physicochemical and nutritional properties of carrots [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(3): 1514-1521.
- [49] CHO W I, CHUNG M S. Improving the quality of vegetable foodstuffs by microwave inactivation [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(1): 85-91.
- [50] JARADAT Z, KHATAYBEH B, AL GHZAWI A M, et al. Molecular identification of major bacteria in honey and the effect of microwave treatment on its microbial quality and antibacterial activity [J]. Aims Agriculture and Food, 2022, 7(3): 594-613.
- [51] MARTINEZ-HERNANDEZ G B, AMODIO M L, COLELLI G. Potential use of microwave treatment on fresh-cut carrots: physical, chemical and microbiological aspects [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(6): 2063-2072.
- [52] ROOHI R, HASHEMI S M B. Experimental, heat transfer and microbial inactivation modeling of microwave pasteurization of carrot slices as an efficient and clean process [J]. Food and Bioprocess Processing, 2020, 121: 113-122.

- [53] EZEANAKAMELVINA C, 张懋, 陈凯, 等. 微波热烫和气调包装对中央厨房用胡萝卜理化特性及品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 46-55.
- [54] FAN X T, WANG W L. Quality of fresh and fresh-cut produce impacted by nonthermal physical technologies intended to enhance microbial safety [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(2): 362-382.
- [55] 谢佳妮, 郭若楠, 宾宇淇, 等. 不同温度对真空包装下鲜切胡萝卜贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(9): 54-61.
- [56] ZHANG J, DU Q, YANG Y, et al. Research progress and future trends of low temperature plasma application in food industry: a review [J]. Molecules, 2023, 28(12): 4714.
- [57] WANG Y H, LIU Y A, ZHAO Y J, et al. Bactericidal efficacy difference between air and nitrogen cold atmospheric plasma on *Bacillus cereus*: inactivation mechanism of Gram-positive bacteria at the cellular and molecular level [J]. Food Research International, 2023, 173: 113204.
- [58] CHEN G Y, DONG S, ZHAO S, et al. Improving functional properties of zein film via compositing with chitosan and cold plasma treatment [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 129: 318-326.
- [59] 张志伟. 常压低温等离子体对鲜切胡萝卜表面金黄色葡萄球菌的杀菌效果及品质影响[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 50-55.
- [60] MAHNOT N K, SIYU L P, WAN Z, et al. In-package cold plasma decontamination of fresh-cut carrots: microbial and quality aspects [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2020, 53(15): 154002.
- [61] 孟宪伟, 汤静, 王春飞, 等. 低温等离子体处理对鲜切胡萝卜品质及抗氧化活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(6): 1179-1186.
- [62] BHATNAGAR P, GURURANI P, BISHT B, et al. Impact of irradiation on physico-chemical and nutritional properties of fruits and vegetables: a mini review [J]. Heliyon, 2022, 8(10): e10918.
- [63] 刘泽松, 史君彦, 王清, 等. 辐照技术在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 236-242.
- [64] BERRIOS-RODRIGUEZ A, OLANYA O M, NIEMIRA B A, et al. Gamma radiation treatment of postharvest produce for *Salmonella enterica* reduction on baby carrot and grape tomato [J]. Journal of Food Safety, 2022, 42(1): e12951.
- [65] 刘芯钥, 陈云堂, 崔龙, 等. 辐照处理对鲜切胡萝卜贮藏品质变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8364-8370.
- [66] SONNTAG F, LIU H H, NEUGART S. Nutritional and physiological effects of postharvest UV radiation on vegetables: a review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(26): 9951-9972.
- [67] 李丽, 易萍, 唐杰, 等. UV-C处理对鲜切胡萝卜低温下贮藏保鲜效果的研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(7): 23-29.
- [68] KAACK K, LYAGER B. Treatment of slices from carrot (*Daucus carota*) using high intensity white pulsed light [J]. European Food Research and Technology, 2007, 224(5): 561-566.
- [69] LIAN Z M, YANG D, WANG Y T, et al. Investigating the microbial inactivation effect of low temperature high pressure carbon dioxide and its application in frozen prawn (*Penaeus vannamei*) [J]. Food Control, 2023, 145: 109401.
- [70] FERRENTINO G, CALLIARI N, BERTUCCO A, et al. Validation of a mathematical model for predicting high pressure carbon dioxide inactivation kinetics of *Escherichia coli* spiked on fresh cut carrot [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2014, 85: 17-23.
- [71] BI X F, WU J H, ZHANG Y, et al. High pressure carbon dioxide treatment for fresh-cut carrot slices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(3): 298-304.
- [72] FERRENTINO G, SPILIMBERGO S. High pressure carbon dioxide combined with high power ultrasound pasteurization of fresh cut carrot [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2015, 105: 170-178.
- [73] ROSS A I V, GRIFFITHS M W, MITTAL G S, et al. Combining nonthermal technologies to control foodborne microorganisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 89(2-3): 125-138.
- [74] LI L, LI C B, SUN J, et al. Synergistic effects of ultraviolet light irradiation and high-oxygen modified atmosphere packaging on physiological quality, microbial growth and lignification metabolism of fresh-cut carrots [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 173: 111365.
- [75] 王梦韦. 不同处理方式对鲜切芦笋保鲜效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [76] ZHOU R W, ZHOU R S, WANG P Y, et al. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2020, 53(30): 303001.
- [77] SAGONG H G, CHEON H L, KIM S O, et al. Combined effects of ultrasound and surfactants to reduce *Bacillus cereus* spores on lettuce and carrots [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 160(3): 367-372.
- [78] BEN-FADHEL Y, CINGOLANI M C, LI L L, et al. Effect of gamma-irradiation and the use of combined treatments with edible bioactive coating on carrot preservation [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100635.
- [79] SONG L Y, YANG H, CHENG S, et al. Combination effects of ultrasound and citral nanoemulsion against *Shigella flexneri* and the preservation effect on fresh-cut carrots [J]. Food Control, 2024, 155: 110069.
- [80] NDOTI-NEMBE A, VU K D, HAN J, et al. Antimicrobial effects of nisin, essential oil, and -irradiation treatments against high load of *salmonella typhimurium* on mini-carrots [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(7): M1544-M1548.