

- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 瑞典开放存取期刊目录 DOAJ
- 美国《化学文摘》CA
- 英国《食品科技文摘》FSTA
- 日本科学技术振兴机构数据库JST
- 世界期刊影响力指数(WJCI)报告
- 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1
- 北大核心期刊
- 中国精品科技期刊
- 中国科技核心期刊CSTPCD
- 中国核心学术期刊RCCSE
- 中国农林核心期刊A
- 中国生物医学Sino Med

超声雾化微酸性电解水对采后娃娃菜流通及货架品质的影响

孟 敌, 焦 贺, 韩 颖, 赵安琪, 王馨渝, 李鹏霞, 胡花丽, 吴朝霞

Effect of Ultrasonic Atomization of Slightly Acidic Electrolyzed Water on The Circulation and Shelf Quality of Postharvest Baby Cabbage

MENG Di, JIAO He, HAN Ying, ZHAO Anqi, WANG Xinyu, LI Pengxia, HU Huali, and WU Zhaoxia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040177>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孟敌, 焦贺, 韩颖, 等. 超声雾化微酸性电解水对采后娃娃菜流通及货架品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 290–298. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040177

MENG Di, JIAO He, HAN Ying, et al. Effects of Ultrasonic Atomization of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Circulation and Shelf Quality of Postharvest Baby Cabbage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 290–298. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040177

· 贮运保鲜 ·

超声雾化微酸性电解水对采后娃娃菜流通及货架品质的影响

孟 敌¹, 焦 贺¹, 韩 颖¹, 赵安琪¹, 王馨渝¹, 李鹏霞^{2,3,4}, 胡花丽^{1,2,3,*}, 吴朝霞^{1,*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏南京 210014;

3. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 江苏南京 210014;

4. 果蔬贮运保鲜产业技术创新战略联盟, 江苏南通 226113)

摘 要: 为了探明微酸性电解水 (Slightly acidic electrolyzed water, SAEW) 对采后娃娃菜货架品质的影响, 本文分析了在低温流通 (4 ± 1) °C 及货架条件 (25 ± 1) °C 下, 不同浓度 (0、50、100 和 150 mg/L) SAEW 超声雾化熏蒸处理对娃娃菜采后保鲜效果的影响。结果显示, 较对照和其它浓度 (50 和 150 mg/L) SAEW 处理相比, 100 mg/L SAEW 超声雾化熏蒸处理在货架第 6 和第 9 d 时显著抑制了娃娃菜丙二醛含量的升高及总硫苷含量的下降 ($P<0.05$)。进一步的流通及货架模拟结果显示, 与对照组相比, 100 mg/L 的 SAEW 超声雾化熏蒸处理使娃娃菜中的菌落总数降低了 17.04%, 总硫苷含量提升了 30.11%; 另外, 该处理显著抑制了采后娃娃菜中亚硝酸盐和丙二醛含量的积累 ($P<0.05$), 延缓了可溶性糖、可溶性蛋白、总酚、抗坏血酸和异硫氰酸酯含量的下降, 提高了黑芥子酶的活性。100 mg/L SAEW 超声雾化熏蒸处理不仅能有效抑制流通及货架期间娃娃菜中菌落总数的生长, 而且可有效减缓该过程中娃娃菜营养品质的流失, 从而提高娃娃菜的保鲜效果。

关键词: 微酸性电解水, 娃娃菜, 衰老, 品质, 亚硝酸盐, 流通, 货架期

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)04-0290-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040177



本文网刊:

Effects of Ultrasonic Atomization of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Circulation and Shelf Quality of Postharvest Baby Cabbage

MENG Di¹, JIAO He¹, HAN Ying¹, ZHAO Anqi¹, WANG Xinyu¹, LI Pengxia^{2,3,4},

HU Huali^{1,2,3,*}, WU Zhaoxia^{1,*}

(1. School of Food Science, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China;

2. Institute of Facilities and Equipment in Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

3. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China;

4. Strategic Alliance for Technological Innovation in the Fruit and Vegetable Storage, Transportation, and Preservation Industry, Nantong 226113, China)

Abstract: To check the effect of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on the shelf quality of postharvest baby cabba-

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 江苏省农业自主创新资金 (CX(22)1014); 江苏省科技攻关计划 (BE2022368)。

作者简介: 孟敌 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: 2268428660@qq.com。

* 通信作者: 胡花丽 (1980-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬流通保鲜与品质调控, E-mail: huhuali203@163.com。

吴朝霞 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养和天然产物, E-mail: wuzxsau@163.com。

ge, the effects of ultrasonic atomization fumigation of SAEW with different concentrations (0, 50, 100 and 150 mg/L) on the postharvest preservation of baby cabbage were analyzed under low temperature circulation (4 ± 1) °C and shelf conditions (25 ± 1) °C. The results showed that, compared with the control and other concentrations of SAEW (50 and 150 mg/L), the ultrasonic atomization fumigation treatment of SAEW at 100 mg/L treatment significantly suppressed the increase in malondialdehyde content and the decrease in total glucosinolate content of baby cabbage at the 6th and 9th days of shelf life ($P<0.05$). Further circulation and shelf simulation results indicated that, compared with the control, the 100 mg/L SAEW ultrasonic atomization fumigation treatment reduced the total number of colonies by 17.04% and increased the total glucosinolate content by 30.11% in baby cabbage; In addition, this treatment significantly inhibited the accumulation of nitrite and malondialdehyde content ($P<0.05$), delayed the decline of soluble sugar, soluble protein, total phenol, ascorbic acid and isothiocyanate content, and increased the activity of myrosinase in postharvest baby cabbage. It was clear that ultrasonic atomization fumigation treatment of SAEW at 100 mg/L could not only effectively inhibit the growth of the total number of colonies in baby cabbage during circulation and shelf life, but also effectively slow down the degradation of nutritional quality in baby cabbage during this process, thus improving the preservation effect of baby cabbage.

Key words: slightly acidic electrolyzed water; baby cabbage; senescence; quality; nitrite; circulation; shelf life

娃娃菜(*Brassica pekinensis*)属于十字花科芸薹属白菜亚种,因外形精致、色泽鲜艳和口感清脆等特点,深受广大消费者喜爱。此外,娃娃菜含有丰富的营养物质,不仅拥有丰富的钙、磷和铁等元素,还含有大量糖类、蛋白质、抗坏血酸和硫苷等活性物质。经常食用可有效防止心血管和肿瘤等疾病的发生^[1]。然而,娃娃菜的叶表面积大,含水量高,采用切割式采收后容易导致呼吸旺盛,品质易劣变。尤其是在货架销售中,娃娃菜表面容易滋生大量细菌,导致腐烂,从而严重影响其商品性。为此,许多研究探查了保持采后娃娃菜品质的技术措施。例如,安容慧等^[1]研究发现,1-甲基环丙烯熏蒸处理可维持采后娃娃菜良好的营养品质及抗氧化活性;陈皖豫等^[2]研究了新型包装材料,通过建立低 O₂+高 CO₂ 的气体微环境,有效维持了采后娃娃菜的较高营养品质;曾诗娴等^[3]研究则发现,通过曲酸溶液浸泡处理娃娃菜茎部切口,可有效抑制娃娃菜茎部褐变;此外,0.1% 的溶菌酶也在延缓鲜切娃娃菜的茎部褐变和抑制营养物质的降解方面显示出有益效果^[4]。在娃娃菜采后病害方面的研究也证实了,软腐病是造成采后娃娃菜组织溃烂的主要致病菌^[5]。

微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是通过 14 A 的电流电解 2.0 g/L 的氯化钠溶液,制取有效氯浓度在 200~300 mg/L, pH 在 6.0 左右的电解水。在食品领域中,与目前广泛使用的次氯酸钠消毒液相比较,其杀菌效果十分显著,是同等浓度次氯酸根离子(ClO⁻)的 80~150 倍。与传统的化学抑菌保鲜剂不同,SAEW 在杀菌后可以完全降解,不会引起食品中氯素残留,是一种绿色健康、安全环保的消毒剂^[6]。许多研究表明,SAEW 的杀菌效果强且有效,可以杀灭多种食源性致病菌,如李斯特菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等^[7]。关于 SAEW 在杀菌消毒方面的有益效果,已广泛应用于番茄和水蜜桃等水果。微酸性电解水结合羧甲基壳聚糖复合保鲜剂可以抑制水蜜桃自身乙烯的产生,减少果实的细胞膜透性,减缓酚类物质的累积,进而延缓了果肉

的色变^[8]。SAEW 还可抑制苹果组织的褐变^[9]。韩颖等^[10]通过研究证实了,微酸性电解水可抑制采后西兰花菌落总数水平及亚硝酸盐含量的升高,减缓抗坏血酸、硫苷等营养物质的降解,最终延长了西兰花的货架期。黄丽萍等^[11]对于蓝莓的研究也表明,SAEW 处理可有效抑制蓝莓果实的呼吸作用,并杀灭其表面的微生物,延缓其贮藏过程中品质的下降。以上研究皆是采用传统浸泡处理的方式,但这种处理方式在落地应用中常因操作繁琐、浪费水资源等问题而受限。相比之下,超声喷雾处理(Ultrasound spray hydration)是利用超声波加湿技术,采用高频振荡,通过雾化片的高频谐振,将水抛离水面而产生极其细化的水雾^[12]。由于其水雾更加细腻,加湿量可控及精准化的特点,具有广阔的应用前景。

低温贮藏可很好地保持娃娃菜的采后品质,但在目前的市场条件下,娃娃菜的货架销售主要是在常温下进行,常导致娃娃菜组织发生腐烂及褐变,从而严重影响其商品品质。然而目前,尚未有关于超声雾化 SAEW 对采后娃娃菜贮藏品质的影响的报道。基于此,本研究以娃娃菜为对象,旨在探讨超声雾化 SAEW 处理对采后娃娃菜流通及货架期间外观品质、菌落总数、亚硝酸盐、丙二醛、抗坏血酸及总硫苷等营养物质的影响,以期对采后娃娃菜的抑菌保鲜提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

娃娃菜 购自江苏省南京市众彩批发市场,采购后 1 h 内送回江苏省农业科学院农业设施与装备研究所实验室,挑选大小均匀、无病虫害的娃娃菜作为试验材料;乙醇、酚酞、蒽酮、盐酸萘乙二胺、硫脲、甲醇 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;乙酸锌、磷酸二氢钾、邻苯二硫醇、草酸、氢氧化钾、对氨基苯磺酸、考马斯亮蓝 G-250、硫代巴比妥酸、异丙醇 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;硼酸、无水葡萄糖、亚铁氰化钾、亚硝酸钠 分析纯,

西陇科学股份有限公司;浓硫酸 分析纯,南京化学试剂股份有限公司;福林酚、三氯乙酸 分析纯,上海源叶生物技术有限公司;葡萄糖试剂盒 北京博世生物技术有限公司。

PL202-L 电子天平、Seven Multi pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;3K15 高速冷冻离心机 德国 Sigma 公司;UV-1102 型紫外-可见分光光度计 上海天美科学仪器有限公司;A11 Basic 型液氮研磨器 艾卡(广州)仪器设备有限公司;“赐绿得”微酸性次氯酸水生成器 南京氯盾科技有限公司;CK-09W 超克超声波加湿器 江苏超克电器制造有限公司;全功能微电脑控制振动试验台 上海华仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)的制备 以 NaCl 溶液为辅液,自来水为原水,用“赐绿得”微酸性次氯酸水生成器制成 SAEW。采用 Seven Multi pH 计对 SAEW 的 pH 进行测定,用碘量法对 SAEW 的有效氯浓度(Available chlorine concentration, ACC)进行测定。测定结果显示,SAEW 的 pH 为 6.0,ACC 为 200 mg/L。后续试验所需 SAEW 浓度将以 ACC 为 200 mg/L 的 SAEW 为母液,用自来水进行稀释。

1.2.2 超声雾化 SAEW 浓度的筛选 将挑选好的娃娃菜随机分为 5 组,每组 36 颗,均匀地摆放在镂空网架上,用超声雾化过的 50、100 和 150 mg/L 的 SAEW 水雾分别熏蒸处理 5 min(雾化率:16.67 mL/s,雾化颗粒:<10 μm ,雾化湿度:90%,待娃娃菜表面形成一层细腻的水雾,熏蒸结束。以不经任何处理直接包装的娃娃菜作为对照 CK₀ 组,以超声雾化过的自来水熏蒸 5 min 作为对照 CK₁ 组。处理结束后打开密封棚罩子,取出镂空网架,在空气中自然沥干 1 h,待娃娃菜表面水滴完全被叶片吸收后,统一采用打孔聚丙烯防雾袋(厚度 20 μm ,规格 300 mm×250 mm)进行包装。每袋 3 颗,每组 12 袋,将袋子封口后先置于(4±1) °C 模拟低温流通 1 d,再置于(25±1) °C 模拟货架销售 9 d,定期观察表型变化,第 9 d 取样,每组取 6 颗,取娃娃菜根部 1.5 cm 处用于菌落总数测定,取外部叶片避开主脉为试验材料,迅速用液氮冷冻,贮存于-80 °C 冰箱保存,用于相关指标的测定。

1.2.3 超声雾化 SAEW 对娃娃菜采后品质的影响 将挑选好的娃娃菜随机分为 3 组,每组 40 颗,整齐摆放到镂空网架上,置于密封棚内,用于随后的处理;娃娃菜不经任何处理,直接包装作为对照 0(CK₀ 组);以超声雾化过的自来水熏蒸娃娃菜 5 min 作为对照 1(CK₁ 组);以超声雾化过的 100 mg/L SAEW 熏蒸娃娃菜 5 min 作为处理组(SAEW),所有雾化参数同 1.2.2。待娃娃菜表面形成一层水雾,熏蒸结

束。后打开密封棚罩子,在空气中自然沥干 1 h,待娃娃菜表面水雾完全被叶片吸收后,统一采用打孔聚丙烯防雾袋(厚度 20 μm ,规格 300 mm×250 mm)进行包装。每袋 3 颗。每组 12 袋,将袋子封口后先置于(4±1) °C 冷库利用振动台模拟低温流通 1 d,再置于(25±1) °C 冷库模拟常温货架 10 d,每 2 d 取一次样,每次取 6 颗,取样及存样的方法同 1.2.2。

1.2.4 丙二醛(MDA)含量的测定 采用硫代巴比妥酸法测定^[13]。取 0.5 g 娃娃菜样品,加入 5 mL 5% 的 TCA 溶液,研磨匀浆,浸提 10 min,离心后取上清,低温备用。取 2 mL 上清加 2 mL 0.67% 的 TBA,混匀后,沸水浴 100 °C 煮沸 20 min,取出后冷却,于 450、532 和 600 nm 处测定吸光度,计算 MDA 含量。单位: $\mu\text{mol/g}$ 。

1.2.5 可溶性糖含量的测定 采用蒽酮比色法^[14],称取 0.5 g 样品,加入 85% 乙醇,研磨匀浆,80 °C 水浴浸提 10 min,冷却 10 min,离心后取上清。吸取 0.1 mL 上清液加入 0.9 mL 80% 乙醇,沿管壁缓缓加入 5 mL 蒽酮,待全部加入后混匀,再于 100 °C 水浴加热 10 min,取出冷却,于 620 nm 处测定吸光度。

1.2.6 可溶性蛋白含量的测定 参照 BRADFORD 等^[15]的方法测定,取 0.5 g 娃娃菜样品,加入 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH7.2)5 mL,匀浆,离心取上清 0.1 mL,加入 0.9 mL 蒸馏水和 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂,混匀于 595 nm 处测定吸光度。

1.2.7 总酚含量的测定 参照 GHASEMNEZHD 等^[16]的方法,略有改动。取 0.5 g 娃娃菜样品,加入 2.5 mL 80% 乙醇,匀浆,离心,取上清 0.1 mL,加入 0.9 mL 蒸馏水,再加入 0.5 mL 福林酚试剂,25 °C 反应 3 min,再加入 1 mL 饱和 Na₂CO₃,25 °C 反应 1 h,反应结束,于 760 nm 处测定吸光度。

1.2.8 抗坏血酸含量的测定 参照 AN 等^[17]方法,略有改动。采用 2,6-二氯靛酚滴定法进行测定。称取 0.5 g 娃娃菜样品,加入 5 mL 草酸溶液,匀浆,离心后取上清 4 mL,转移至锥形瓶中,用 2,6-二氯靛酚滴定,溶液呈粉红色且 15 s 不褪色为止,同时吸取 10 mL 草酸溶液做空白试验,用 1.000 mg/mL 的抗坏血酸标准液进行标定。

1.2.9 菌落总数的测定 菌落总数的测定采用 GB 4789.2-2022,食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定^[18]。

1.2.10 亚硝酸盐含量的测定 采用盐酸萘乙二胺法^[19],称取 0.5 g 娃娃菜样品,加入 2.5 mL 50 g/L 的饱和硼砂溶液,充分混匀,再加入 2.5 mL 70 °C 左右蒸馏水,于沸水浴中加热 15 min,取出冷却 10 min,边转边加入 1 mL 106 g/L 的亚铁氰化钾溶液,再加入 1 mL 220 g/L 的乙酸锌溶液,摇匀后静置 30 min,离心。取上清 2.5 mL,加入 2 mL 4 g/L 的对氨基苯磺酸溶液,静置 5 min,加入 1 mL 2 g/L 的盐酸萘

乙二醇溶液, 常温静置 15 min, 于 538 nm 处测定吸光度。

1.2.11 总硫代葡萄糖苷含量的测定 参照 HWANG 等^[20]的方法, 略有改动。取 0.5 g 娃娃菜样品, 加入 3.0 mL 蒸馏水, 匀浆, 于 37 ℃ 水浴酶解反应 1 h, 使硫苷完全被内源黑芥子酶分解, 同时另取一份样品, 加入 3.0 mL 酸化甲醇研磨匀浆, 于 80 ℃ 加热 5 min 灭酶, 后向样品中加入 2.0 mL 100% 的甲醇溶液, 使其中的多酚类化合物沉淀后, 离心, 取上清。用葡萄糖试剂盒测定葡萄糖含量, 由硫苷分解生成的葡萄糖的物质的量, 与硫苷的物质的量相等, 以此计算硫苷物质的量, 单位: $\mu\text{mol/g}$ 。

1.2.12 黑芥子酶活性的测定 参照 ZHANG 等^[21]的方法, 略有改动。取 0.5 g 娃娃菜样品, 加入 2 mL 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH6.5), 在 4 ℃ 下浸提 1 h, 离心, 上清液即为粗酶液, 取 300 μL 粗酶液加入 200 μL 2.0 mmol/L 的黑芥子苷溶液, 混匀后于 37 ℃ 水浴 15 min, 然后置于沸水浴 5 min 以终止反应。采用葡萄糖试剂盒检测生成的葡萄糖含量, 以每分钟生成 1 nmol 葡萄糖为 1 个酶活, 单位: U/g。

1.2.13 异硫氰酸酯含量的测定 参照罗淑芬等^[22]的方法, 略有改动。取 0.5 g 娃娃菜样品, 加入 1.5 mL 蒸馏水, 浸提 15 min, 离心, 取上清, 依次加入 0.25 mL 硼酸缓冲液 (pH8)、0.5 mL 7.0 mmol/L 的邻苯二硫醇, 充分混匀后于 65 ℃ 水浴 1 h, 于波长 365 nm 处测定吸光度, 以萝卜硫素标品定量, 单位: $\mu\text{mol/g}$ 。

1.3 数据处理

采用 Origin 2021 软件绘制图表, 所有数据为重

复的平均值 $\pm$ 标准误差, 显著性采用 SPSS 24.0 软件进行邓肯氏多重差异分析 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 超声雾化 SAEW 浓度的筛选

2.1.1 不同浓度 SAEW 超声雾化熏蒸处理对采后娃娃菜外观品质的影响 图 1 显示了不同浓度 SAEW 对采后娃娃菜外观品质的影响情况, 由图可看出, 随着贮藏时间的延长, 两个对照组娃娃菜的外观均出现明显的腐烂症状。相比之下, SAEW 的超声雾化处理可明显减轻娃娃菜外观组织的腐烂程度, 尤其是 100 mg/L 的 SAEW 处理, 完全抑制了娃娃菜在 (25 ± 1) ℃ 贮藏 9 d 期间的腐烂。

2.1.2 不同浓度 SAEW 超声雾化熏蒸处理对采后娃娃菜丙二醛、总硫苷及菌落总数的影响 由图 2 可看出, 随着贮藏时间的延长, 除了 100 mg/L 的 SAEW 处理外, 两个对照组和其它浓度 SAEW 处理组娃娃菜的丙二醛含量均明显增加。在贮藏第 6 d 和第 9 d 时, 100 mg/L 的 SAEW 处理显著抑制了采后娃娃菜中丙二醛含量的积累 ($P<0.05$)。

图 3 显示了不同浓度 SAEW 处理对采后娃娃菜总硫苷含量的影响, 可看出, 随着贮藏时间的延长, 娃娃菜中的总硫苷含量呈下降趋势。然而, 100 mg/L 的 SAEW 处理显著减缓了娃娃菜中总硫苷的下降 ($P<0.05$)。例如在货架第 9 d 时, 100 mg/L SAEW 处理组的总硫苷含量为 0.39 $\mu\text{mol/g}$, 分别比对照组 CK₀ 和 CK₁ 高出 74.13% 和 71.79%, 比 50 mg/L 和 150 mg/L SAEW 处理组高出了 69.23% 和 63.33%。

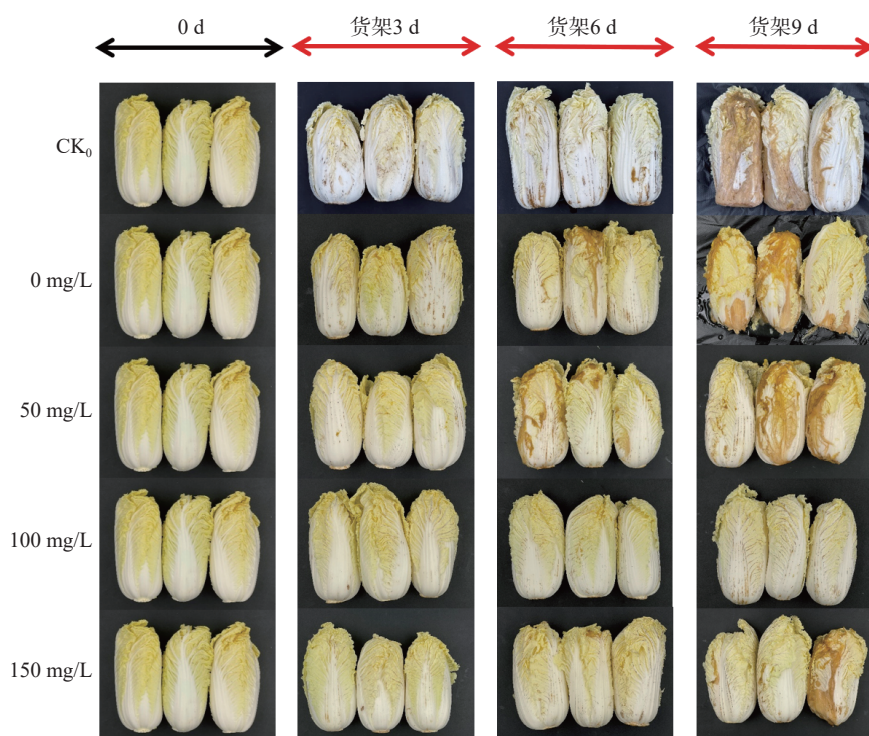


图 1 不同浓度 SAEW 对采后娃娃菜外观品质的影响

Fig.1 Effect of different concentrations of SAEW on the appearance quality of postharvest baby cabbage

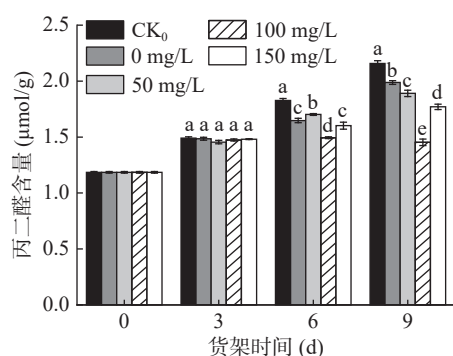


图2 不同浓度 SAEW 对采后娃娃菜中丙二醛含量的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of SAEW on the contents of malondialdehyde in postharvest baby cabbage

注:不同小写字母表示同一时间不同组之间差异显著($P<0.05$),图3~图4同。

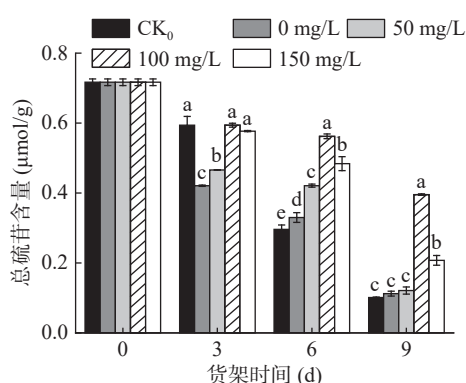


图3 不同浓度 SAEW 对采后娃娃菜中总硫苷含量的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of SAEW on the contents of total glucosinolates in postharvest baby cabbage

图4为不同浓度 SAEW 处理对采后娃娃菜中菌落总数的影响,可看出,随着贮藏时间的延长,娃娃菜组织中的菌落总数明显增加,然而相较于两个对照和 50 mg/L 的 SAEW 处理组相比,100 和 150 mg/L 的 SAEW 处理显著延缓了娃娃菜中菌落总数的升高($P<0.05$)。

综上,基于不同浓度 SAEW 雾化熏蒸处理对娃娃菜外观品质、丙二醛、总硫苷含量及菌落总数的影响特点,优选出 100 mg/L 的 SAEW 用于后续的试验。

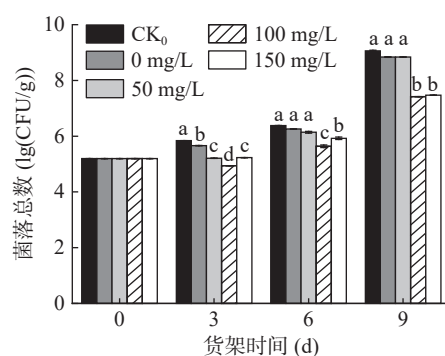


图4 不同浓度 SAEW 对采后娃娃菜中菌落总数的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of SAEW on the level of total bacterial colonies in postharvest baby cabbage

2.2 超声雾化 SAEW 对采后娃娃菜流通及货架品质的影响

2.2.1 外观品质 图5显示了 SAEW 超声雾化处理对娃娃菜外观品质的影响,可看出,娃娃菜在流通 1 d 内,对照组与处理组间的外观品质之间无明显差异。然而,随着货架时间的延长,无论是对照 CK₀ 还是 CK₁ 组娃娃菜的表面均出现腐烂斑点。相比之下,在货架 6 d 内,SAEW 处理维持了娃娃菜较好的外观品质,从货架第 8 d 才开始出现轻微的腐烂斑点。尽管如此,货架第 10 d 时,经 SAEW 处理娃娃菜的外观品质也优于货架第 6 d 时 CK₀ 和 CK₁ 组娃娃菜的外观品质。可见,超声雾化 SAEW 处理可较好地维持采后娃娃菜的外观品质。

2.2.2 丙二醛含量 由图6可看出,在娃娃菜流通及货架期间,其组织内的丙二醛含量总体呈上升趋势。从流通 1 d 到货架 2 d 期间,处理组与对照组的丙二醛含量之间无显著性差异,但在随后的货架期间,SAEW 处理均显著抑制了娃娃菜中丙二醛含量的积累($P<0.05$)。例如,在货架第 4、6、8 和 10 d 时,SAEW 处理组的 MDA 含量分别比同期的 CK₀ 低了 13.51%、18.12%、18.41% 和 30.01%,亦比同期的 CK₁ 低了 5.02%、9.73%、13.72% 和 23.94%。这些结果表明 SAEW 处理可较好地保护采后娃娃菜膜组织的完整性。

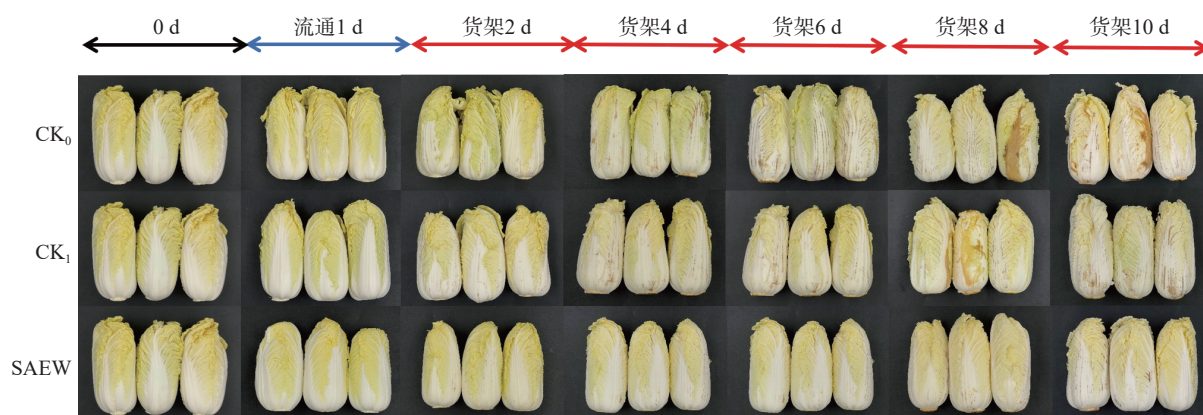


图5 SAEW 处理对采后娃娃菜外观品质的影响

Fig.5 Effect of SAEW treatment on appearance quality of postharvest baby cabbage

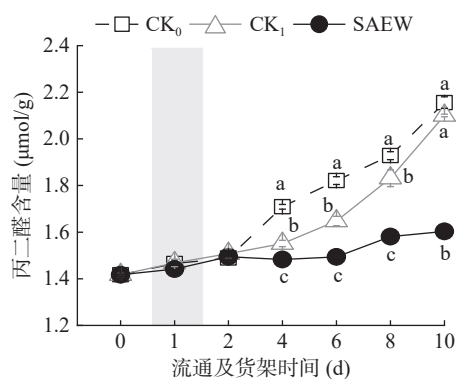


图 6 SAEW 处理对采后娃娃菜中丙二醛含量的影响

Fig.6 Effect of SAEW treatment on malondialdehyde content in postharvest baby cabbage

2.2.3 营养品质 由图 7A 可看出,在娃娃菜流通及货架期间,其组织内的可溶性糖含量总体呈下降趋势,但 SAEW 处理娃娃菜中的可溶性糖含量始终高于其在两个对照中的水平。例如,在货架第 10 d 时,CK₀、CK₁ 和处理组的可溶性糖含量分别为 2.62、4.81 和 5.73 mg/g,该值分别是 0 d 样品中可溶性糖含量的 37.61%、69.12% 和 82.32%。这些结果表明超声雾化 SAEW 处理可减缓娃娃菜组织内可溶性糖含量的下降。

由图 7B 可看出,在整个流通及货架期间,娃娃菜组织中的可溶性蛋白含量总体呈先上升后下降的趋势,经 SAEW 处理娃娃菜中的可溶性蛋白含量显著高于其在两个对照组中的水平($P<0.05$),尤其是在货架后期,这种差异更加明显。例如,在货架第 10 d 时,SAEW 处理组娃娃菜的可溶性蛋白含量为 49.71 mg/g,分别为同期对照组 CK₀ 和 CK₁ 的 1.11 和 1.06 倍。可见,超声雾化 SAEW 处理可延缓娃娃菜组织内可溶性蛋白含量的下降。

果蔬组织中的酚类物质可高效反映其抗氧化能力的强弱。由图 7C 可看出,在娃娃菜流通及货架期间,其组织内的总酚含量总体呈先上升后下降趋势,其中 CK₁ 和 CK₀ 的总酚含量分别在货架第 4 d (2.70 mg/g) 和第 6 d (2.73 mg/g) 时达到峰值,而 SAEW 处理组的总酚含量在货架第 8 d (2.84 mg/g) 才达到峰值。因此在贮藏第 8 d 时,SAEW 处理娃娃菜中的总酚含量分别为 CK₀ 和 CK₁ 的 1.08 和 1.07 倍。在货架第 10 d 时,对照组 CK₀ 和 CK₁ 中的总酚含量分别为 2.57 和 2.65 mg/g,显著低于其在 SAEW 处理组的水平($P<0.05$)。这些结果表明,超声雾化 SAEW 处理可抑制娃娃菜组织中总酚含量的下降。

图 7D 为 SAEW 处理对采后娃娃菜抗坏血酸含量的影响,可看出,抗坏血酸含量的总体变化趋势与可溶性糖、可溶性蛋白含量的变化类似。在流通及货架期间,娃娃菜组织中的抗坏血酸含量总体上亦呈下降趋势。在流通 1 d 时,处理组与对照组的抗坏血酸含量之间无显著差异($P<0.05$),但从货架第 4 d 直至货架结束,SAEW 处理均显著抑制了娃娃菜中抗

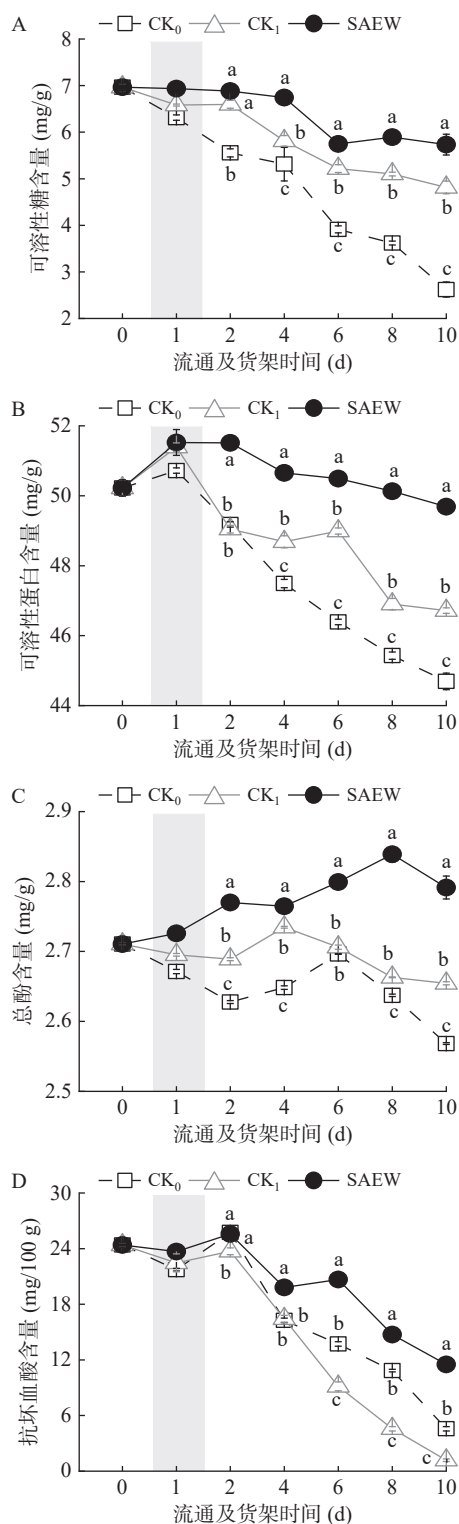


图 7 SAEW 处理对采后娃娃菜营养品质的影响

Fig.7 Effects of SAEW treatment on the nutritional quality in postharvest baby cabbage

注: A: 可溶性糖; B: 可溶性蛋白; C: 总酚; D: 抗坏血酸。

坏血酸含量的下降($P<0.05$)。例如,在货架第 4、6、8 和 10 d 时,SAEW 处理娃娃菜中的抗坏血酸含量为 19.92、20.71、14.70、11.50 mg/100g,分别比同期 CK₀ 高了 21.52%、33.81%、26.53% 和 60.04%,比同期 CK₁ 高了 20.70%、56.02%、69.01% 和 89.22%。可见,超声雾化 SAEW 处理显著抑制了采后娃娃菜中抗坏血酸的降解($P<0.05$)。

2.2.4 菌落总数 如图8所示,在娃娃菜流通及货架期间,其菌落总数总体呈上升趋势。在流通1 d时,处理组与对照组的菌落总数间无显著性差异,但在随后的货架期间,处理组的菌落总数水平显著低于两个对照组($P<0.05$)。在货架第10 d时,处理组娃娃菜的菌落总数为7.08 lg(CFU/g),比对照CK₀和CK₁分别低了20.11%和17.04%。可见,超声雾化SAEW处理显著减少了采后娃娃菜中菌落总数的水平。

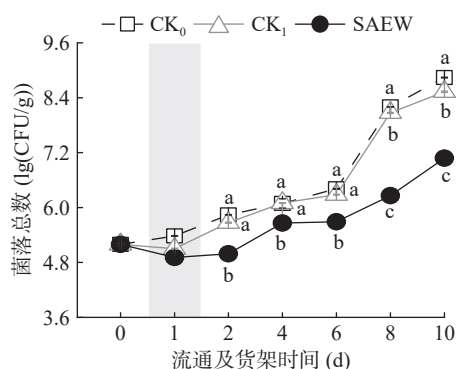


图8 SAEW处理对采后娃娃菜中菌落总数的影响
Fig.8 Effect of SAEW treatment on the total number of colonies in postharvest baby cabbage

2.2.5 亚硝酸盐 如图9所示,在流通1 d到货架4 d期间,SAEW处理与两个对照组中的亚硝酸盐含量之间无显著性差异,但在随后的货架期间,SAEW处理娃娃菜中的亚硝酸盐含量显著低于其在CK₀和CK₁中的水平($P<0.05$)。在货架第10 d时,SAEW处理、CK₀和CK₁中的亚硝酸盐含量分别为3.02、7.61和9.07 mg/kg,分别为0 d的1.35、3.40、4.05倍。这些结果表明超声雾化SAEW处理可有效抑制采后娃娃菜组织内亚硝酸盐含量的上升。

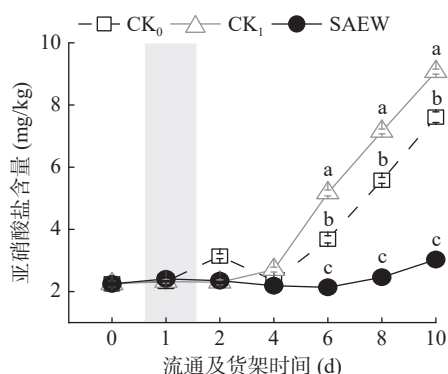


图9 SAEW处理对采后娃娃菜中亚硝酸盐含量的影响
Fig.9 Effect of SAEW treatment on nitrite content in postharvest baby cabbage

2.2.6 硫苷代谢 图10A为SAEW对采后娃娃菜总硫苷含量的影响,可看出,在流通及货架期间,尽管娃娃菜中的总硫苷含量总体呈下降趋势,但处理组的总硫苷含量显著高于两个对照组($P<0.05$)。例如,在货架第6、8和10 d时,处理组的总硫苷含量为

0.71、0.61和0.58 $\mu\text{mol/g}$,比同期CK₀组分别高出15.50%、30.11%和55.22%,比同期CK₁组分别高出15.51%、30.32%和34.54%。因此相比采后0 d的总硫苷含量,在货架第10 d时,SAEW处理组的总硫苷含量仅下降了18.01%,然而CK₀和CK₁组的总硫苷含量则分别下降了69.91%和45.82%。可见,超声雾化SAEW处理显著延缓了娃娃菜组织中总硫苷含量的下降($P<0.05$)。

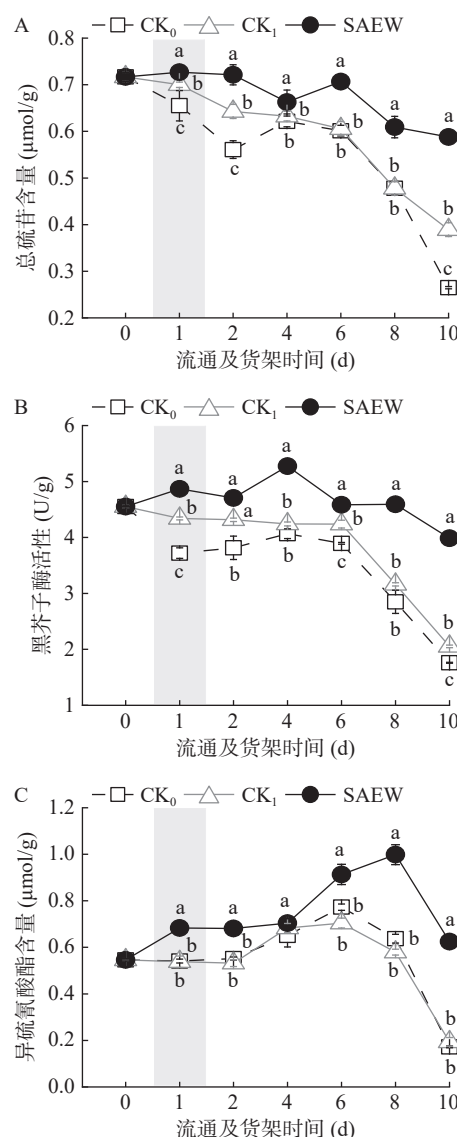


图10 SAEW处理对采后娃娃菜硫苷代谢的影响
Fig.10 Effects of SAEW treatment on the glucosinolate metabolism in postharvest baby cabbage
注:A: 总硫苷;B: 黑芥子酶;C: 异硫氰酸酯。

由图10B可看出,在娃娃菜流通及货架期间,SAEW处理组的黑芥子酶活性显著高于两个对照组($P<0.05$),尤其是在货架第4 d时,SAEW处理组的黑芥子酶活性为5.27 U/g,分别为对照组CK₀和CK₁的1.30和1.24倍;在随后的货架期间,SAEW处理及两个对照组的黑芥子酶活性均有所下降,至货架第10 d时,SAEW处理组的黑芥子酶活性为3.99 U/g,其比对照CK₀和CK₁中的黑芥子酶活性

分别高出 91.82% 和 114.51%。可见, 超声雾化 SAEW 处理显著提高了娃娃菜组织中的黑芥子酶活性($P<0.05$)。

由图 10C 可看出, 在流通及货架期间, 两个对照组娃娃菜的异硫氰酸酯含量均在货架第 6 d 达到峰值, 而 SAEW 处理组的峰值则出现在货架第 8 d。随后所有样品中的异硫氰酸酯含量均出现明显下降, 至货架第 10 d 时, SAEW 处理中的异硫氰酸酯含量为 $0.62 \mu\text{mol/g}$, 分别为对照组 CK_0 和 CK_1 的 3.65 和 3.26 倍。这些结果表明超声雾化 SAEW 处理有效延缓了娃娃菜组织内异硫氰酸酯的降解($P<0.05$)。

3 讨论

实验室前期对导致娃娃菜腐烂的致病菌进行了分离与鉴定, 发现细菌性病害是导致娃娃菜腐烂的主要菌群, 未能检测到真菌侵染^[5], 基于此, 本研究对娃娃菜中的菌落总数进行了测定, 结果显示, 娃娃菜组织中的菌落总数水平随流通及货架时间的延长总体呈上升趋势, 其茎部腐烂程度也逐渐加重, 但经 SAEW 雾化熏蒸处理后, 其外观组织的腐烂程度明显减轻。在货架第 10 d 时仍可保持较好的外观品质, 这可能与 SAEW 维持组织较低的菌落总数水平有关。韩颖等^[10]研究也发现, SAEW 处理能显著延缓采后西兰花菌落总数水平的升高, 从而延长其货架期。Song^[23]的研究也显示, SAEW 可杀灭泡菜中的致病菌, 高效保障其商品价值。可见, SAEW 对娃娃菜商品特性及货架期的延长作用与其有效抑制致病菌的滋生有关。

丙二醛(MDA)是膜质过氧化的重要产物, 过量累积会对膜结构造成损伤, 进而导致果蔬腐烂。本研究结果表明, SAEW 处理娃娃菜中的 MDA 含量, 在货架末仍显著低于对照组。这与 ZHANG 等^[24]的研究结果相似, 发现 SAEW 处理可抑制杨桃细胞膜通透性增加, 延缓其品质下降。另外, 蔬菜中亚硝酸盐的积累通常是由于种植过程中使用过量的氮肥, 导致硝酸盐在蔬菜体内积累。在贮运过程中, 硝酸盐还原菌会将硝酸盐还原为具有毒性的亚硝酸盐^[25]。本研究结果表明, SAEW 熏蒸处理娃娃菜中的亚硝酸盐含量要显著低于两个对照组。这可能是由于 SAEW 中的有效氯抑制了硝酸盐还原酶的活性, 从而减缓了硝酸盐向亚硝酸盐的转化能力^[26]。在鸡毛菜的研究中也显示, 微酸性电解水与真空预冷的联合处理可有效减缓组织中亚硝酸盐含量的增长。因此, SAEW 熏蒸处理可有效抑制娃娃菜中 MDA 及亚硝酸盐含量的增加, 提升其贮藏保鲜效果。

通常, 新鲜的娃娃菜含有丰富的营养物质, 如可溶性糖和可溶性蛋白, 可溶性糖可反映果蔬的甜度风味, 可溶性蛋白则能提高细胞的保水能力、保护细胞膜的完整性。本研究发现, SAEW 熏蒸处理显著延缓了娃娃菜流通及货架期间可溶性糖及可溶性蛋白含量的下降。王文文^[27]的研究也显示, 随着贮藏时

间的延长, SAEW 处理和对照组的粗蛋白和可溶性糖含量均呈下降趋势, 但处理组的下降幅度显著低于对照组。总酚是重要的抗氧化、抗衰老物质, 在整个流通及货架期间, 酚类物质的含量不断下降。在本研究中, 总酚含量呈先升高后降低的趋势, SAEW 熏蒸处理可显著延缓娃娃菜中总酚含量的下降, 并推迟其峰值的到来。俞静芬等^[28]研究也发现, 微酸性电解水联合气调包装处理可延缓鲜切茼蒿中总酚含量的下降。抗坏血酸也是一种重要的抗氧化物质, 具有改善贫血、增强抵抗力等作用。本研究结果显示, SAEW 熏蒸处理显著延缓了娃娃菜中抗坏血酸含量的降解。刘瑞等^[29]的研究也证实了, 绿豆芽经 20~30 mg/L 微酸性电解水浸泡处理后, 其组织总抗坏血酸含量显著高于对照。总硫代葡萄糖苷是十字花科植物中特有的活性成分, 它主要存在于植物组织的液泡中, 而黑芥子酶则分布在细胞质中。当植物组织细胞衰老时, 细胞膜透性增加, 增加了黑芥子酶与硫苷接触的机会, 当硫代葡萄糖苷被黑芥子酶催化后, 可生成具有显著抗癌活性的异硫氰酸酯。本研究结果表明, 随着流通及货架时间的延长, 总硫苷含量逐渐下降, 异硫氰酸酯呈先上升后降低的趋势, 然而 SAEW 熏蒸处理可以显著降低娃娃菜中总硫苷、异硫氰酸酯的降解。这与李瑞敏^[30]在萝卜芽苗上的研究结果相一致。

4 结论

100 mg/L 的 SAEW 处理可显著维持娃娃菜采后流通及货架期间较好的外观品质, 抑制菌落总数、丙二醛和亚硝酸盐水平的升高, 延缓营养物质可溶性糖、可溶性蛋白、总酚、抗坏血酸、总硫苷和异硫氰酸酯的降解, 提高黑芥子酶活性。可见, 超声雾化 SAEW 熏蒸处理可作为一种提高娃娃菜采后流通及货架期间营养品质、减少有害物质及微生物滋生的有效措施。因此, 需要进一步分析超声雾化 SAEW 熏蒸对娃娃菜采后致病菌的抑制机制。

参考文献

- [1] 安容慧, 陈皖豫, 胡花丽, 等. 1-甲基环丙烯对娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 194–203. [AN R H, CHEN W Y, HU H L, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on storage quality and antioxidant activity of baby cabbage[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(20): 194–203.]
- [2] 陈皖豫, 安容慧, 胡花丽, 等. 薄膜包装对娃娃菜采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 1–10. [CHEN W Y, AN R H, HU H L, et al. Effect of film packaging on postharvest storage quality of brassica pekinensis[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 1–10.]
- [3] 曾诗娴, 赵孝玲, 左进华, 等. 曲酸处理对娃娃菜采后褐变的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 241–247. [ZENG S X, ZHAO X L, ZUO J H, et al. Effects of kojic acid treatment on postharvest browning of baby cabbage[J]. Food Science, 2021, 42(17): 241–247.]
- [4] 李翠红, 魏丽娟, 李长亮, 等. 不同保鲜剂对鲜切娃娃菜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(3): 22–28. [LI C H, WEI L J, LI C L, et al. Effects of different preservatives on the quality and antioxidant activity of fresh-cut baby cabbages

- during storage[J]. *Preservation and Processing*, 2021, 21(3): 22–28.]
- [5] 赵欢欢, 张元元, 张映瞳, 等. 娃娃菜软腐病原菌的分离与鉴定[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 106–111. [ZHAO H H, ZHANG Y Y, ZHANG Y T, et al. Isolation and identification of pathogenic bacteria causing soft rot of *brassica campestris*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 106–111.]
- [6] 张建中, 王芳, 彭云, 等. 微酸性电解水性能及其在消毒领域的应用价值[J]. *广州化工*, 2021, 49(7): 130–133, 163. [ZHANG J Z, WANG F, PENG Y, et al. Performance of slightly acidic electrolyzed water and application value in disinfection field[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, 49(7): 130–133, 163.]
- [7] MANSUR A R, OH D. Combined effects of thermosonication and slightly acidic electrolyzed water on the microbial quality and shelf life extension of fresh-cut kale during refrigeration storage[J]. *Food Microbiology*, 2015, 51: 154–162.
- [8] 周然, 谢晶, 高启耀, 等. 微酸性电解水结合壳聚糖对水蜜桃护色保鲜的效果[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 281–286. [ZHOU R, XIE J, GAO Q Y, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water and carboxymethyl chitosan preservative on flesh discoloration of peaches[J]. *Transactions of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 281–286.]
- [9] LIU Q, CHEN L, CARRASCO L, et al. Synergistic action of electrolyzed water and mild heat for enhanced microbial inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 revealed by metabolomics analysis[J]. *Food Control*, 2020, 110: 107026.
- [10] 韩颖, 安容慧, 孙莹, 等. 微酸性电解水对采后西兰花贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(5): 338–346. [HAN Y, AN R H, SUN Y, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water on the storage quality of postharvest broccoli[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(5): 338–346.]
- [11] 黄丽萍, 靳学远, 李勇, 等. 微酸性电解水对蓝莓保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(10): 134–138. [HUANG L P, JIN X Y, LI Y, et al. Effect of slightly acidic electrolytic water on blueberry sterilization process and storage quality[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(10): 134–138.]
- [12] 王天宇. 超声喷雾热解法制备 Si_3N_4 纤维基柔性耐高温复合膜的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022: 1–14. [WANG T Y. Study on preparation of Si_3N_4 fiber-based flexible high temperature resistant composite membrane by ultrasonic spray pyrolysis[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022: 1–14.]
- [13] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 142–154. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical experimental guidance of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013: 142–154.]
- [14] 赵安琪, 安容慧, 王馨渝, 等. 真空预冷中的雾化微酸性电解水处理对鸡毛菜低温流通及其货架期品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(3): 218–227. [ZHAO A Q, AN R H, WANG X Y, et al. Effect of atomized slightly acidic electrolyzed water treatment in vacuum precooling on the quality of postharvest Chinese little greens during low temperature circulation and shelf[J]. *Food Science*, 2023, 44(3): 218–227.]
- [15] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(12): 248–254.
- [16] GHASEMNEZHAD M, SHERAFATI M, PAYVAST G A. Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annum*) fruits at two different harvest times[J]. *Journal of Functional Foods*, 2011, 3(1): 44–49.
- [17] AN R H, LUO S F, ZHOU H S, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110469.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 4789.2-2022 食品国家安全标准 食品中菌落总数的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022: 1–5. [National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. GB 4789.2-2022 National food safety standard. Determination of aerobic plate count in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2022: 1–5.]
- [19] 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.33-2016 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10–12. [China Food and Drug Administration. GB 5009.33-2016 National food safety standard. Determination of nitrites and nitrates in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 10–12.]
- [20] HWANG I M, PARK B, DANG Y M, et al. Simultaneous direct determination of 15 glucosinolates in eight Brassica species by UHPLC-Q-Orbitrap-MS[J]. *Food Chemistry*, 2019, 282: 127–133.
- [21] ZHANG Y, MAKAZA N, JIANG C M, et al. Supplementation of cooked broccoli with exogenous moringa myrosinase enhanced isothiocyanate formation[J]. *Food Chemistry*, 2022, 395: 133651.
- [22] 罗淑芬, 郭峰, 孙莹, 等. 6-苄氨基嘌呤处理对鲜切西兰花硫代葡萄糖苷代谢的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 295–304. [LUO S F, GUO F, SUN Y, et al. Effect of 6-benzylaminopurine treatment on glucosinolate metabolism in fresh-cut broccoli[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 295–304.]
- [23] SONG J H. Inactivation of bacteria causing soft rot disease in fresh cut cabbage using slightly acidic electrolyzed water[J]. *Food Control*, 2021, 128(1): 1–5.
- [24] ZHANG J, LIU Q Q, CHEN X Z, et al. Slightly acidic electrolyzed water treatment improves the quality and storage properties of carambola fruit[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17: 1–8.
- [25] 柳凯, 解双瑜, 李智, 等. 盐度对紫甘蓝自然发酵过程中细菌多样性及品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(11): 379–389. [LIU K, XIE S Y, LI Z, et al. Effects of salinity on bacterial diversity and quality during natural fermentation of purple cabbage[J]. *Journal of Chinese Journal of Food Science*, 2022, 22(11): 379–389.]
- [26] HAO J X, LI H Y, WAN Y F, et al. Effect of electrolyzed oxidizing water treatment on the reduction of nitrite levels in fresh spinach during storage[J]. *Journal of Food Protection*, 2015, 78(3): 549–553.
- [27] 王文文. 微酸性电解水对桑叶氯铃脲降解及叶面消毒效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020: 13–27. [WANG W W. Study on degradation of hexaflumuron in mulberry leaves and the effect of foliar disinfection effect by slightly acidic electrolyzed water[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020: 13–27.]
- [28] 俞静芬, 尚海涛, 林旭东, 等. 微酸性电解水与气调包装对鲜切茼蒿保鲜效果研究[J]. *现代农机*, 2021(5): 50–54. [YU J F, SHANG H T, LIN X D, et al. Study on the effect of slightly acidic electrolyzed water and modified atmosphere packaging on fresh-cut lettuce[J]. *Modern Agricultural Machinery*, 2021(5): 50–54.]
- [29] 刘瑞, 张冬晨, 非泽悟, 等. 微酸性电解水对绿豆芽内源植物激素含量及基本营养成分的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(4): 6. [LIU R, ZHANG D C, LI Z W, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water on the phytohormones content and nutrients of mungbean sprouts[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(4): 6.]
- [30] 李瑞敏. 十字花科芽苗中硫代葡萄糖苷及其水解产物的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 13–26. [LI R M. Study of glucosinolate and its hydrolysates products in cruciferous sprouts [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016: 13–26.]