

微酸性电解水对采后西兰花贮藏品质的影响

韩颖，安容慧，孙莹，王馨渝，郭峰，李鹏霞，吴朝霞，李国锋，胡花丽

Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Storage Quality of Postharvest Broccoli

HAN Ying, AN Ronghui, SUN Ying, WANG Xinyu, GUO Feng, LI Pengxia, WU Zhaoxia, LI Guofeng, and HU Huali

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050095>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微酸性电解水杀菌工艺优化及对云南鲜米线贮藏品质影响

Optimization of the Sterilization Process of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Its Effect on the Storage Quality of Yunnan Fresh Rice Noodles

食品工业科技. 2021, 42(1): 204–210 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030389>

微酸性电解水处理对野生菌贮藏品质的影响

Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water Treatment on Storage Quality of Fresh Wild Fungus

食品工业科技. 2020, 41(22): 281–289 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030077>

超声波协同微酸性电解水对小龙虾净化及品质的影响

Effect of Ultrasonic and Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Purification and Quality of Crayfish

食品工业科技. 2021, 42(21): 182–189 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020092>

不同预冷方式对西兰花货架期品质的影响

Effect of Different Precooling Methods on Shelf Life Quality of Broccoli

食品工业科技. 2020, 41(20): 266–272 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.044>

预冷处理结合低温贮藏对西兰花贮藏品质的影响

Effect of Pre-cooling Treatment and Low Temperature Storage on Storage Quality of Broccoli

食品工业科技. 2021, 42(7): 302–310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050006>

微酸性电解水结合钙处理对采后桃果实组织结构及水分迁移的影响

Effect of slightly acidic electrolyzed water in combination with Ca (NO₃)₂ on tissue structure and water mobility of peach fruit during storage

食品工业科技. 2017(18): 279–284 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.053>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050095

HAN Ying, AN Ronghui, SUN Ying, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050095

· 贮运保鲜 ·

微酸性电解水对采后西兰花贮藏品质的影响

韩 颖¹, 安容慧², 孙 莹¹, 王馨渝¹, 郭 峰¹, 李鹏霞^{2,3}, 吴朝霞¹, 李国锋^{2,3}, 胡花丽^{1,2,3,*}

(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)

摘要:为了探究微酸性电解水 (Slightly acidic electrolyzed water, SAEW) 对采后西兰花贮藏品质的影响, 本研究首先进行了微酸性电解水浓度的筛选, 将西兰花切成均等的小花球, 随机分成五组, 以自来水浸泡 15 min 后晾干作为对照, 以 25、50、75 和 85 mg/L 的微酸性电解水浸泡 15 min 后晾干作为不同处理组, 置于 15±1 °C 贮藏 4 d, 依据不同浓度微酸性电解水对采后西兰花外观品质、总叶绿素及丙二醛 (MDA) 含量的影响筛选最适宜的浓度。结果表明, 与对照和其它浓度的 SAEW 处理相比, 50 mg/L SAEW 可更好地维持采后西兰花的外观品质及总叶绿素含量, 并抑制其 MDA 含量的积累。进一步研究显示, 与对照组相比, 50 mg/L SAEW 可有效维持采后西兰花的感官品质, 抑制其菌落总数的升高, 延缓其维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白、可滴定酸、总硫苷和萝卜硫素含量的下降, 并可有效抑制组织中亚硝酸盐含量的升高。这些结果表明 50 mg/L SAEW 可作为一种维持采后西兰花贮藏品质、延缓其衰老进程的有效处理方法。

关键词:微酸性电解水, 西兰花, 贮藏品质, 杀菌, 亚硝酸盐

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0338-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050095

本文网刊:



Effect of Slightly Acidic Electrolyzed Water on the Storage Quality of Postharvest Broccoli

HAN Ying¹, AN Ronghui², SUN Ying¹, WANG Xinyu¹, GUO Feng¹, LI Pengxia^{2,3,*},
WU Zhaoxia¹, LI Guofeng^{2,3}, HU Huali^{1,2,3,*}

(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)

Abstract: To explore the effect of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) on the storage quality of postharvest broccoli, firstly, broccoli was cut into florets, randomly divided into five groups, and treated with different concentrations (25, 50, 75 and 85 mg/L) of SAEW for 15 min and then drained, using tap water as control. Then, broccoli was stored at 15±1 °C for 4 days. The effects of different concentrations of SAEW on the appearance quality, total chlorophyll and malondialdehyde (MDA) of postharvest broccoli were analyzed, then the suitable SAEW concentration was selected for further investigation. The results showed that 50 mg/L SAEW could better maintain the appearance quality and total chlorophyll content, and inhibit the accumulation of MDA in postharvest broccoli as compared with the control and other concentrations of SAEW. Further studies indicated that 50 mg/L SAEW could effectively maintain the sensory quality, inhibit the increase of total

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 江苏省农业自主创新资金 (CX(20)1008); 江苏省现代农业面上项目 (BE2022368)。

作者简介: 韩颖 (1999-) (ORCID: 0000-0003-2612-7387), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: yinghan0116@163.com。

* 通信作者: 胡花丽 (1980-) (ORCID: 0000-0002-1673-4629), 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。

bacterial count, delay the decrease of vitamin C, soluble sugar, soluble protein, titratable acid, total glucosinolates and sulforaphane, and suppress the increase of nitrite content in postharvest broccoli compared to the control group. These results suggest that 50 mg/L SAEW can be used as an effective treatment method due to its ability to maintain the storage quality and delay the senescence process of postharvest broccoli.

Key words: slightly acidic electrolytic water (SAEW); broccoli; storage quality; sterilization; nitrite

西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italica*)是一种优质的十字花科蔬菜, 因含有必需营养素和生物活性物而具有抗癌、防癌的功效^[1]。但由于西兰花采用机械采收, 切割面受到伤害及污染, 导致其生化反应加速, 微生物大量滋生, 严重损害了西兰花的商品价值^[2]。所以, 合理的保鲜技术对于西兰花延缓老化至关重要。目前适用于西兰花的保鲜技术主要包括: 减压、微波、包装、臭氧、乙醇、杀菌剂等^[3]。其中, 臭氧和杀菌剂等虽然有稳定高效的抗菌功效, 但其杀菌机制却并不健全^[4]。

微酸性电解水(Slightly acidic electrolyzed water, SAEW)是电解 NaCl(KCl 或 MgCl₂)稀溶液或稀盐酸而产生的溶液, 因其可高效杀菌, 保持食品的物理品质、营养品质和感官特性, 而被广泛应用于果蔬和水产品等的杀菌保鲜中^[5]。MANSUR 等^[6]研究表明, SAEW 通过抑制鲜切甘蓝中致病菌的污染, 可延长其保质期; 类似的研究表明, SAEW 对鲜切胡萝卜也有着较好的抑菌效果^[7]; YE 等^[8]阐明了 SAEW 使大肠杆菌的细胞酯酶活性下降, 造成大肠杆菌失活的杀菌机制。许瀛引等^[9]将 SAEW 和超声结合, 有效提高了六味羊肚菌中超氧化物歧化酶和维生素 C 含量, 有效延长其保鲜时间; 也有研究发现, 将 SAEW 与超声结合, 可使采后甘薯的保质期延长^[10]; 支欢欢等^[11]采用 SAEW 与钙源结合, 改善“尖脆”枣果实采收货架品质。LI 等^[12]发现 SAEW 通过促进蛋氨酸代谢和增加芥子酶活性来提高西兰花芽苗菜中活性物质萝卜硫素的含量。但尚未见 SAEW 对采后西兰花贮藏品质影响的报道。

基于此, 本研究以西兰花为对象, 研究了 SAEW 对西兰花抑菌效果、外观品质、感官品质、营养品质以及活性成分总硫代葡萄糖苷和萝卜硫素的影响, 以为采后西兰花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

西兰花 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装备所处理室, 挑选个头、成熟度基本一致, 颜色翠绿的西兰花作为试验材料; 无水乙醇、盐酸、硫酸、硫代巴比妥酸、乙二胺四乙酸、磷酸二氢钾、葱酮、硫脲、酚酞、G-250 考马斯亮蓝、三水合六氰铁酸钾、乙酸锌、对氨基苯磺酸、硼酸 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 葡萄糖、二氯甲烷 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 活性炭 中聚活性炭有限公司; 葡萄糖试剂

盒 南京建成生物科技有限公司; 萝卜硫素 色谱纯, 美国 Sigma 公司; 甲醇、乙腈 均为色谱纯, 美国 Avantor Performance Materials 公司。

旺旺水神 HD-240L 次氯酸生成器 上海旺普贸易有限公司; Seven Multi pH 计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; 1260 高效液相色谱仪 美国 Agilent 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; KY-II 型水浴式氮吹仪 安简(北京)科技有限公司; Epoch 酶标仪 美国 Bioteke 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SAEW 的制备 以 9% 稀盐酸溶液作为辅液, 自来水为原水, 用“水神”微酸性次氯酸水生成机电解生成 SAEW。采用 Seven Multi pH 计对 SAEW 的 pH 进行测定, 碘量法测定其有效氯浓度(Available chlorine concentration, ACC)。经测定, SAEW 的 pH 为 6.5, ACC 为 85 mg/L。后续实验所需浓度将以 ACC 为 85 mg/L 的 SAEW 为母液, 用自来水进行稀释。

1.2.2 SAEW 处理西兰花浓度的筛选 将符合实验条件的西兰花用新刀切成均等的小花球, 随机分成五组(每组约 60 个花球)。以自来水浸泡 15 min 的处理组作为对照(CK), 其余四组分别浸入 25、50、75 和 85 mg/L 的 SAEW 中 15 min, 取出沥干后装入 4.5 L 带孔乐扣盒中, 然后置于 15±1 °C 贮藏, 第 4 d 进行取样, 每组随机取 3 盒, 每盒约 20~25 个花球。取花球的周边部位及中心部位的花蕾为材料, 用液氮冷冻, 测定叶绿素和 MDA。根据西兰花的表型、总叶绿素和 MDA 含量, 选择适宜的 SAEW 处理浓度。

1.2.3 SAEW 对西兰花贮藏品质的影响 依据浓度筛选实验的结果, 将挑选的西兰花随机分成两组, 分别浸泡于自来水和 50 mg/L 的 SAEW 15 min, 取出沥干后装入 4.5 L 带孔乐扣盒中, 然后置于 15±1 °C 贮藏 4 d, 期间每天取样 1 次, 每组随机取 3 盒, 每盒 20~25 个花球。取花球的周边部位及中心部位的花蕾为材料, 并用液氮冷冻, 用于各项指标的测定(取同期鲜样来测定菌落总数)。

1.2.4 总叶绿素含量的测定 参考 HU 等^[13]的方法并稍作修改。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加入 5.0 mL 80% 丙酮, 避光常温浸提 6 h, 过滤后取上清液, 以 80% 丙酮为空白校零, 测定在

642 和 665 nm 处提取液的吸光值, 重复测定 3 次, 计算公式如下。

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = \frac{[9.99A_{665} - 0.087A_{642}] + (17.7A_{642} - 3.04A_{665}) \times V}{W}$$

式中: V 表示提取液总体积, mL; W 表示样品重量, g。

1.2.5 丙二醛含量的测定 采用硫代巴比妥酸法测定^[14]。取 0.5 g 样品, 加 5.0 mL 5% 三氯乙酸溶液冰浴研磨, 离心取上清 2.0 mL, 加入 2.0 mL 硫代巴比妥酸溶液, 摆匀后沸水浴 15 min, 冷却后在 450、532 和 600 nm 处测定吸光值, 重复测定 3 次, 计算公式如下。

$$\text{丙二醛含量}(\mu\text{mol/g}) = \frac{[6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56A_{450}] \times V_1 \times V}{V_2 \times W}$$

式中: V 表示提取液总体积, mL; V₁ 表示反应液总量, mL; V₂ 表示反应液中的提取液体积, mL; W 表示样品重量, g。

1.2.6 感官评分 参照 RIZZOLO 等^[15]的方法。挑选经过培训的 5 男 5 女共 10 人分别对每个花球的 6 项指标(表 1)进行感官评价, 取平均值。具体评价环境为: 在 20 ℃ 空气无异味、光线充足的感官评价室进行。每个处理取 10 个花球分别置于白板上观察。

1.2.7 菌落总数测定 采用 GB/T 4789.2-2010《食品卫生微生物学检验菌落总数测定》^[16]。

1.2.8 维生素 C 含量的测定 采用 2,6-二氯靛酚滴定法^[17]进行测定。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加入 10.0 mL 草酸溶液萃取 5 min, 加入 0.5 g 活性炭离心, 取 4.0 mL 上清液于锥形瓶中, 用标定过的 2,6-二氯靛酚溶液滴定, 溶液呈粉红色 15 s 不褪色为止, 重复滴定 3 次, 取平均值。空白试验: 用蒸馏水代替上清液。计算公式如下。

$$\text{维生素C含量}(\text{mg/g}) = \frac{(V - V_0) \times T \times A}{W}$$

式中: V 表示滴定试样所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; V₀ 表示滴定空白所消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; T 表示 2,6-二氯靛酚溶液的滴定

度, mg/mL; A 表示稀释倍数; W 表示样品重量, g。

1.2.9 可滴定酸含量的测定 参照刘红锦等^[18]的方法。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加 8.0 mL 水, 80 ℃ 水浴上加热 30 min, 冷却 5 min, 加入 0.5 g 活性炭离心。取 3.0 mL 上清液于锥形瓶中, 加入酚酞指示剂, 用 0.001 mol/L NaOH 滴定, 直至溶液成为淡红色, 30 s 不褪色为终点。重复滴定 3 次, 取平均值。空白试验: 用蒸馏水代替上清液。计算公式如下。

$$\text{可滴定酸含量}(\%) = \frac{(C \times A \times K \times C_1) \times 100}{W \times D}$$

式中: C 为氢氧化钠消耗量, mL; A 表示氢氧化钠浓度, mol/L; C₁ 表示上清液总体积, mL; W 表示样品质量, g; D 表示测定取样量, mL; K 表示主要酸的换算系数(0.045)。

1.2.10 可溶性蛋白含量的测定 采用 BRADFORD^[19]的方法测定, 取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加入 5.0 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH7.2)匀浆, 离心取上清液 0.1 mL, 加入 0.9 mL 蒸馏水和 5.0 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液, 混匀用于测定。

$$\text{可溶性蛋白含量}(\text{mg/g}) = \frac{C \times V}{V_1 \times W}$$

式中: C 表示标准曲线查得蛋白质含量, mg; V 表示上清液总体积, mL; V₁ 表示反应液中的上清体积, mL; W 表示样品重量, g。

1.2.11 可溶性糖含量的测定 采用蒽酮法^[20]。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加入 5.0 mL 80% 乙醇, 匀浆。80 ℃ 水浴上加热 10 min, 冷却。离心取上清液 0.5 mL 于试管中, 沿管壁缓缓加入 5.0 mL 硫酸-蒽酮试剂, 加完后混匀。将标准管与样品管同时在 100 ℃ 水浴中加热 10 min。于 620 nm 测定吸光度。

$$\text{可溶性糖含量}(\text{mg/g}) = \frac{C \times V}{V_1 \times W}$$

式中: C 表示标准曲线查得葡萄糖含量, mg; V 表示上清液总体积, mL; V₁ 表示反应液中的上清体积, mL; W 表示样品重量, g。

1.2.12 总硫苷含量的测定 采用初婷等^[21]的方法并稍作修改。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰

表 1 感官评分标准

Table 1 Standard for sensory evaluation

指标	评分(分)			
	10~7.5(含10)	7.5~5(含7.5)	5~2.5(含5)	2.5~0(含2.5)
色泽	花球鲜绿	个别花蕾发黄	局部发黄	整体开始变黄
气味	西兰花特有清香	无清香无异味	轻微异味	严重异味
茎部脆度	硬度大, 脆度大	脆度硬度降低, 开始枯塌	切口向内凹陷, 组织变艮	整体褶皱, 萎缩
霉变程度	新鲜、无腐败	无腐败但不新鲜	<30%腐败变质	30%以上腐败变质
花球组织状态	花球结构紧凑	花球略散	局部开始松散、掉粒	组织严重松散、掉粒
整体水嫩程度	水分饱满	个别花蕾萎蔫, 切口开始失水	面积萎蔫, 切口严重失水	严重脱水, 褶皱严重

花粉末, 加入 3.0 mL 蒸馏水研磨均匀, 于 37 °C 水浴 1 h; 同时, 另取一份样品, 加入 3.0 mL 酸化甲醇研磨匀浆后, 于 80 °C 加热 5 min, 作为对照。然后向样品中加入 2.0 mL 100% 甲醇, 离心取上清液。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, 单位为 $\mu\text{mol/g}$ 。

$$\text{总硫苷含量}(\mu\text{mol/g}) = \frac{(C_1 - C_2) \times 1000}{n \times W}$$

式中: C_1 表示标准曲线查得蒸馏水提取样品葡萄糖含量, mg; C_2 表示标准曲线查得酸化甲醇提取样品葡萄糖含量, mg; n 表示葡萄糖物质的量, mol; W 表示样品重量, g; 1000 为转换系数。

1.2.13 萝卜硫素含量的测定 参照 GUO 等^[22] 的试验方法, 略作修改。取 0.5 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加入 5.0 mL 蒸馏水, 混匀后置于 37 °C 摆床中振荡提取 3 h, 然后用 10.0 mL 二氯甲烷萃取, 离心取 5.0 mL 下清液, 用氮吹仪吹干, 加入 2.0 mL 乙腈, 于低温下超声避光溶解, 过 0.22 μm 有机滤膜, 滤液用 1260 高效液相色谱仪测定, 采用外标法。液相色谱条件: 色谱柱采用 C₁₈ 柱(250 mm×4.6 mm×5 μm), 紫外检测波长为 254 nm, 流速为 1.0 mL/min, 进样量为 10.0 μL , 柱温设置为 30 °C。流动相 A 为超纯水, 流动相 B 为乙腈, 洗脱程序: 0 min~25 min~30 min, 体积分数为 10% 乙腈~60% 乙腈~100% 乙腈。

1.2.14 亚硝酸盐含量的测定 采用盐酸萘乙二胺法^[23] 进行测定。取 1.0 g 经液氮研磨器研磨后的西兰花粉末, 加 5.0 mL 饱和硼酸溶液, 搅拌均匀, 再加入 5.0 mL 70 °C 蒸馏水, 混匀, 沸水浴中加热 15 min, 冷却后加入 2.0 mL 亚铁氰化钾溶液, 摆匀后

加入 2.0 mL 乙酸锌溶液。摇匀静置 30 min 后, 离心后取 2.5 mL 上清液和 2.5 mL 标准液分别加入 2.0 mL 对氨基苯磺酸溶液, 混匀静置 5 min 后, 加入 1.0 mL 盐酸萘乙二胺溶液, 混匀静置 15 min 后, 于 538 nm 处测定吸光值。

$$\text{亚硝酸盐含量}(\mu\text{g/g}) = \frac{m_1 \times V_0}{W \times V_1}$$

式中: m_1 表示标准曲线查得用样液中亚硝酸钠的质量, μg ; V_0 表示测定用样液总体积, mL; W 表示样品重量, g; V_1 表示测定用样液体积, mL。

1.3 数据处理

所有试验数据为 3 个平行样品测定结果的平均值±标准误差。显著性采用 SPSS 22.0 软件进行 *t*-test 检验($P<0.05$), 并用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 SAEW 处理西兰花浓度的筛选

西兰花的外观品质及其组织中的叶绿素和丙二醛(MDA)含量是贮藏期间黄化衰老的重要衡量指标。图 1 A 显示了贮藏第 4 d 时, 不同浓度 SAEW 处理对西兰花外观品质的影响。可以看出, CK 组西兰花的花蕾出现严重的黄化现象, 失去商品价值; 低浓度(25 mg/L)的 SAEW 处理对西兰花黄化的影响不明显, 而浓度为 50、75 和 85 mg/L SAEW 均可以减缓西兰花的黄化。

在贮藏第 4 d 时, 总叶绿素含量(图 1 B)的结果显示, CK 和 25 mg/L SAEW 处理组的西兰花总叶绿素含量无显著差异($P>0.05$), 但显著低于 50、75 和 85 mg/L SAEW 处理组($P<0.05$), 后三者无显著差异($P>0.05$); MDA 含量(图 1 C)的结果表明, CK 和 25 mg/L SAEW 处理组的西兰花 MDA 含量分别为 4.90 和 4.51 $\mu\text{mol/g}$, 二者均显著高于 50、75 和 85 mg/L

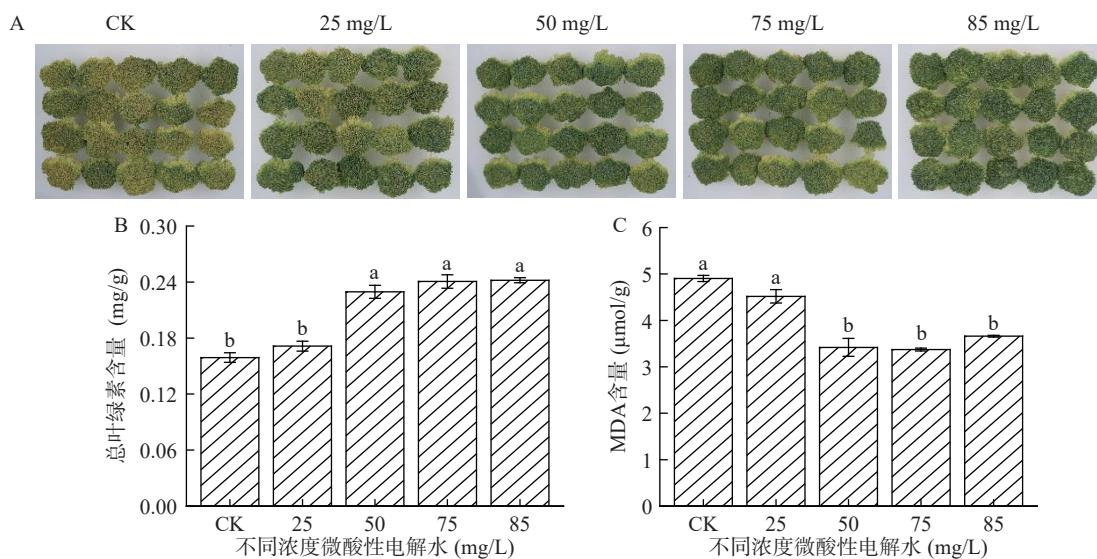


图 1 不同浓度 SAEW 处理对采后西兰花表型(A)、总叶绿素(B)和 MDA(C)含量的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of SAEW on the phenotype (A), the contents of total chlorophyll (B) and MDA (C) of postharvest broccoli

注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

SAEW 处理组的 MDA 含量($P<0.05$)。

实验结果(图 1)表明 50、75 和 85 mg/L 的 SAEW 可更好地维持西兰花的外观品质及叶绿素含量, 抑制 MDA 的积累。因此, 从节约成本的角度考虑, 优选出 50 mg/L 的 SAEW 作为进一步处理的浓度。

2.2 SAEW 对采后西兰花外观品质的影响

图 2 的结果显示, 在整个贮藏期, 采后西兰花逐渐黄化、松散。在贮藏第 3 d 时, CK 组出现黄化迹象, 在贮藏第 4 d 时花蕾黄化加重且伴有松散、掉粒现象, 失去商品价值; 与 CK 组相比, SAEW 处理减缓了西兰花的黄化进程, 贮藏至第 3 d 时仍有较好的外观品质, 无明显黄化; 在贮藏期结束才出现轻微黄化现象。可见, 50 mg/L SAEW 处理在延缓西兰花外观品质的劣变方面具有一定的效果, 可使采后西兰花的货架期延长 1 d。



图 2 SAEW 处理对采后西兰花外观品质的影响

Fig.2 Effect of SAEW treatment on the appearance quality of postharvest broccoli

2.3 SAEW 对采后西兰花感官品质的影响

西兰花的感官品质可结合表 1 进行综合评价(图 3)。CK 组西兰花的整体品质相对下降幅度较快, 在贮藏至第 3 d 时部分花蕾逐渐转黄, 花球略为松散, 各项指标评分均显著低于处理组; 第 4 d 时 CK 组花球整体变黄, 结构严重松散、掉粒, 六项指标

综合评分下降到 5 分以下, 失去了商品价值。尽管, 50 mg/L SAEW 处理组西兰花在贮藏期各感官指标也有所下降, 但在贮藏第 4 d 时六项指标的综合平均分仍有 6.42 分, 是 CK 组的 1.83 倍。可见, 50 mg/L SAEW 处理可明显减缓西兰花感官品质的下降。

2.4 SAEW 对采后西兰花菌落总数的影响

采后西兰花因富含营养成分, 易造成微生物的大量滋生, 尤其是在常温下加速了其腐败和衰老的速度, 菌落总数超过 6 lg CFU/g 视为不可食用^[24]。由图 4 可以看出, 两组西兰花的菌落总数随贮藏时间逐步增加。与 CK 组相比, SAEW 处理显著减缓了西兰花中菌落总数的升高($P<0.05$), 在贮藏第 1、2、3 和 4 d 时分别比 CK 组低 15.0%、8.0%、5.1% 和 4.4%。50 mg/L SAEW 处理在整个贮藏阶段显著抑制了采后西兰花微生物的滋生($P<0.05$), 这是因为 SAEW 中的有效氯成分可以破坏细菌细胞膜结构^[25], 且与唐志龙等^[26]发现 SAEW 凝胶可以控制天麻切片微生物繁殖的结果一致, 故 SAEW 可以抑制采后西兰花微生物滋生。

2.5 SAEW 对采后西兰花总叶绿素含量的影响

研究表明, 西兰花的黄化进程与叶绿素息息相关^[27]。由图 5 可知, SAEW 处理组西兰花组织中的总叶绿素含量高于 CK 组。在贮藏第 1、2、3 和 4 d 时, SAEW 处理组的总叶绿素含量分别为 0.50、0.48、0.34 和 0.22 mg/g, 分别比同期的 CK 组高出 6.9%、7.7%、34.0% 和 39.5%。可见, 50 mg/L SAEW 处理减缓了西兰花组织中总叶绿素含量的下降, 尤其是在贮藏第 3 d 和第 4 d 时, 极显著地延缓了西兰花组织中叶绿素含量的下降($P<0.05$), 延缓了其黄化进程。近年来的研究也证实了通过不同处理西兰花可

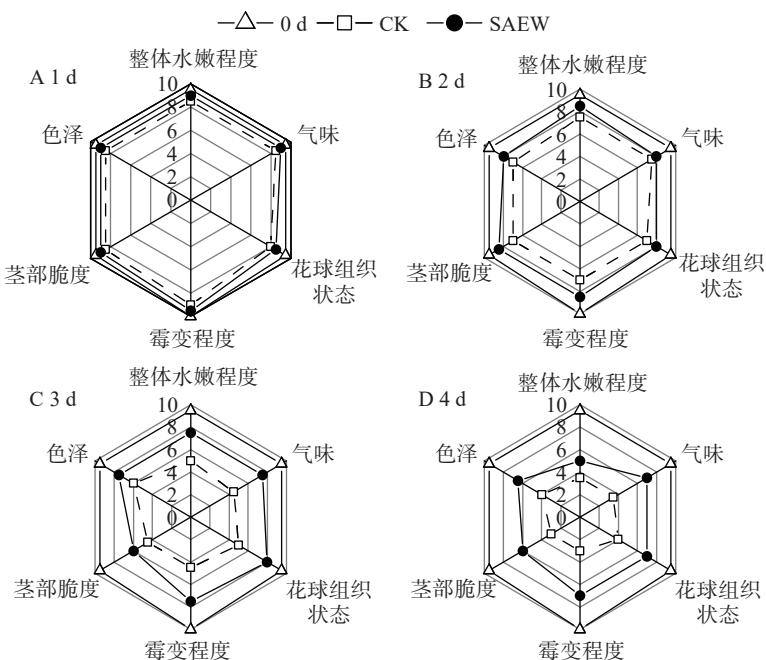


图 3 SAEW 处理对采后西兰花感官品质的影响

Fig.3 Effect of SAEW treatment on the sensory quality of postharvest broccoli

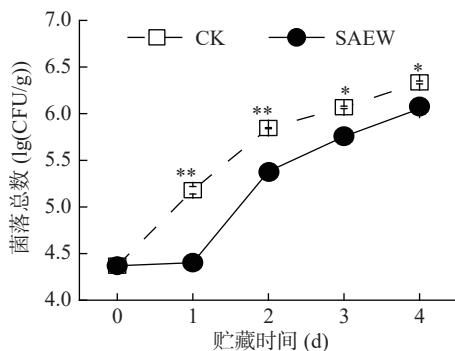


图 4 SAEW 处理对采后西兰花菌落总数的影响

Fig.4 Effect of SAEW treatment on the total number of postharvest broccoli colonies

注: *表示在 0.05 水平上差异显著; **表示在 0.01 水平上差异显著; 图 5~图 8 同。

以减缓其叶绿素的衰减。张雪等^[28]研究表明鲜切西兰花在低温贮藏下可有效降低叶绿素的流失, 延缓黄化。桑煜等^[29]研究发现真空减压技术能有效地延缓其叶绿素降解, 改善保鲜效果。也有研究通过缺氧条件处理西兰花来维持其较好的外观品质^[30]。本试验通过外观品质(图 2)、感官品质(图 3)和叶绿素含量(图 5)表明, 50 mg/L SAEW 处理亦可显著延缓采后西兰花叶绿素的降解($P<0.05$), 起到较好的护色效果, 延长货架期。

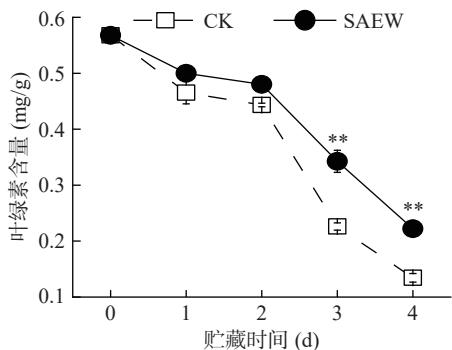


图 5 SAEW 处理对采后西兰花总叶绿素含量的影响
Fig.5 Effects of SAEW treatment on the total chlorophyll content in postharvest broccoli

2.6 SAEW 对采后西兰花 V_C 、可滴定酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

在整个贮藏期间, 两组西兰花的 V_C 含量逐渐降解(图 6 A)。与 CK 组相比, SAEW 处理组显著减缓了西兰花中 V_C 含量的下降速度($P<0.05$)。在贮藏第 2、3 和 4 d 时, SAEW 处理组 V_C 含量分别为 0.18、0.16 和 0.11 mg/g, 较 CK 组高 34.5%、24% 和 52.95%, 极显著高于 CK 组($P<0.01$)。在贮藏第 4 d 时, SAEW 处理组的 V_C 含量与 CK 组在第 3 d 时的 V_C 含量(0.12 mg/g)相当。由此可知, 50 mg/L SAEW 处理能较好地抑制西兰花贮藏期间 V_C 的降解。

CK 与 SAEW 处理组西兰花组织中可滴定酸含量均呈下降的趋势(图 6 B)。相比之下, 除第 1 d 外, SAEW 处理组的可滴定酸含量整体高于 CK 组, 且

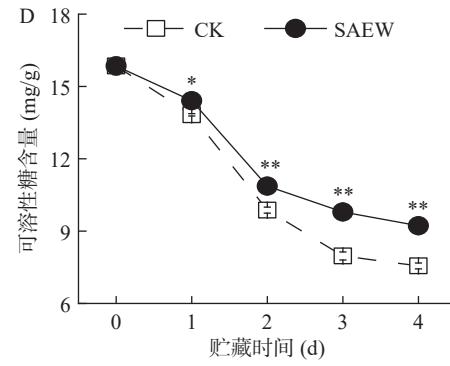
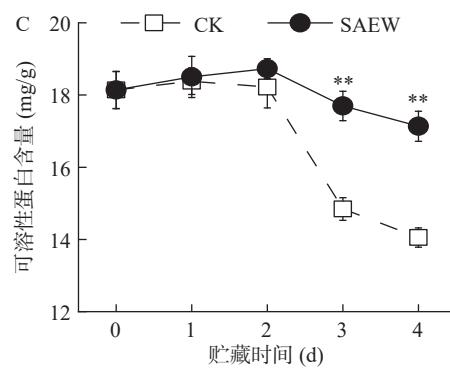
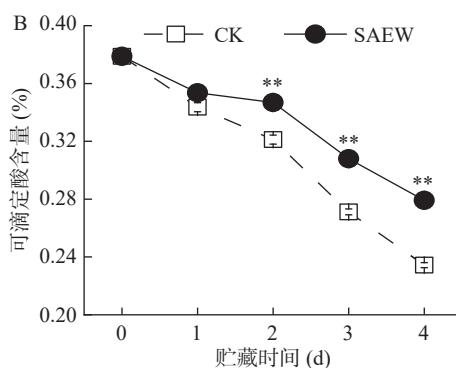
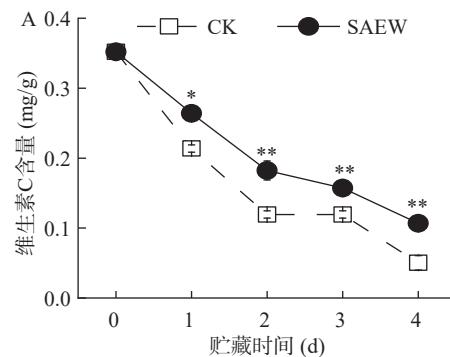


图 6 SAEW 处理对采后西兰花 V_C (A)、可滴定酸(B)、可溶性蛋白(C)和可溶性糖(D)含量的影响

Fig.6 Effects of SAEW treatment on the contents of V_C (A), titratable acid (B), soluble protein (C) and soluble sugar (D) in postharvest broccoli

在 2~4 d 达到极显著差异的水平($P<0.01$)。在贮藏第 4 d 时, SAEW 处理组西兰花的可滴定酸含量为 0.28%, 是 CK 组的 1.22 倍。可见, 50 mg/L SAEW 处理可有效减缓采后西兰花中可滴定酸含量的下降。

可溶性蛋白和可溶性糖是植物重要营养成分和能量供给物质。随着西兰花贮藏时间的延长, 其组织

中可溶性蛋白(图6C)和可溶性糖(图6D)含量不断被消耗。在贮藏后期(3~4 d), SAEW 处理西兰花组织中的可溶性蛋白和可溶性糖含量极显著高于CK组($P<0.01$)。例如,在贮藏第3和4 d时, SAEW 处理组西兰花的可溶性蛋白含量分别为17.70和17.13 mg/g,两者比CK组同期样品中的可溶性蛋白含量分别高出16.1%和18.0%。在贮藏第4 d时, CK与SAEW 处理组的可溶性糖含量分别为7.56、9.22 mg/g,与贮藏初期相比下降了52.3%和41.8%。赵安琪等^[31]通过SAEW联合预冷对鸡毛菜进行处理,也表明了SAEW可以有效维持蔬菜组织中的V_C、可滴定酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量。本试验的结果也显示,50 mg/L SAEW 处理可以延缓西兰花中V_C、可滴定酸营养成分的衰减;维持可溶性蛋白和可溶性糖的能量供给;有效维持采后西兰花中的营养价值。

2.7 SAEW 对采后西兰花中总硫苷和萝卜硫素含量的影响

硫苷是西兰花中最重要的生物活性物质,CK组的西兰花总硫苷含量在贮藏1、2和3 d呈下降趋势,到了贮藏第4 d总硫苷含量无显著下降($P>0.05$); SAEW 处理组西兰花的总硫苷含量呈先上升后下降的趋势(图7 A)。在贮藏第1、2和3 d时, SAEW 处理组西兰花中的总硫苷含量分别为1.85、0.85和0.85 μmol/g,分别比CK组高出18.3%、24.7%、50.6%。

图7 B的结果表明,西兰花组织中的萝卜硫素含量均呈先上升后下降的趋势,在贮藏第1、2和

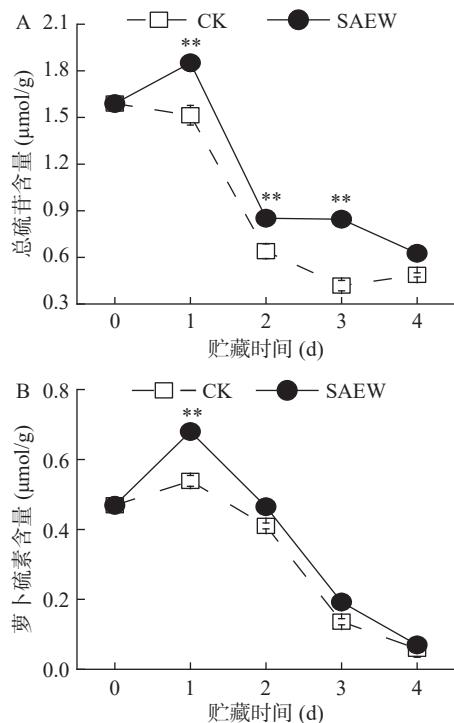


图7 SAEW 处理对采后西兰花中总硫苷(A)和萝卜硫素(B)含量的影响

Fig.7 Effects of SAEW treatment on the contents of total glucosinolate (A) and sulforaphane (B) in postharvest broccoli

3 d时, SAEW 处理组西兰花的萝卜硫素含量分别为0.68、0.46和0.19 μmol/g,分别是CK组的1.26、1.12和1.36倍。已有研究表明^[32],6-BA 处理能够有效减缓西兰花组织内总硫苷、可溶性糖、可溶性蛋白、可滴定酸的下降;龚春燕等^[33]研究表明通过处理可以有效维持西兰花组织中的总硫苷及萝卜硫素含量。本试验的结果也显示,50 mg/L SAEW 处理可以显著维持西兰花中总硫苷和萝卜硫素的含量($P<0.05$)。

2.8 SAEW 对采后西兰花中亚硝酸盐含量的影响

亚硝酸盐的积累是影响西兰花采后品质的重要因素之一,引起这一现象的主要原因在于种植过程中氮肥的过量使用^[34]。随着西兰花贮藏时间的增加,其组织中亚硝酸盐逐渐富集(图8)。两组西兰花中的亚硝酸盐含量在贮藏第1 d无显著差异($P>0.05$),而在第2、3和4 d时, SAEW 处理组西兰花中的亚硝酸盐含量分别为0.92、1.15和2.00 μg/g,分别较CK组低了16.4%、26.3%和18.0%。可见,50 mg/L SAEW 处理能显著延缓西兰花中有害物质亚硝酸盐含量的升高($P<0.05$),这与李慧颖等^[35]发现 SAEW 可以有效去除果蔬中的农药残留的结果一致。

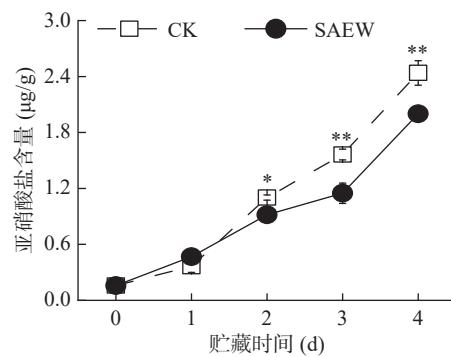


图8 SAEW 处理对采后西兰花亚硝酸盐含量的影响

Fig.8 Effect of SAEW treatment on the nitrite content in postharvest broccoli

3 结论

通过浓度筛选试验发现,微酸性电解水(SAEW)对采后西兰花叶绿素降解,丙二醛积累及组织黄化的影响呈现浓度依赖效应,其中50 mg/L SAEW 处理的效果最好。进一步的研究发现,50 mg/L SAEW 处理显著抑制了采后西兰花菌落总数的增长及亚硝酸盐的积累($P<0.05$),减缓了营养物质维生素C、可滴定酸、可溶性糖和可溶性蛋白及活性成分总硫苷和萝卜硫素含量的下降,最终使采后西兰花的货架期延长了1 d。综上,本试验证明了 SAEW 对西兰花的贮藏保鲜作用,为 SAEW 应用在采后西兰花抑菌保鲜方面提供了理论依据和技术参考。

参考文献

- [1] 吴广辉,毕韬韬.西兰花营养价值及深加工研究进展[J].农产品加工,2015,21: 61–63. [WU G H, BI T T. Advances in nutritional value and deep processing of broccoli [J]. Processing of Agricultural Products, 2015, 21: 61–63.]

- [2] 赵欢欢, 罗淑芬, 周宏胜, 等. 光照和湿度对西兰花硫苷代谢及生物活性物质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 12: 1–12.
- [ZHAO H H, LUO S F, ZHOU H S, et al. Effect of fluorescence irradiation and relative humidity on the glucosinolate metabolism and contents of bioactive substance in fresh-cut broccoli [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 12: 1–12.]
- [3] 谢晓宇. 采后西兰花保鲜技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [XIE X Y. Research on fresh keeping technology of post harvest broccoli [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
- [4] 于皎雪, 胡文忠, 赵曼如, 等. 鲜切西兰花保鲜技术研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(15): 288–293. [YU J X, HU W Z, ZHAO M R, et al. Research progress on preservation technology for fresh-cut broccoli [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(15): 288–293.]
- [5] 戚铭, 罗自生, 王蕾, 等. 微酸性电解水在食品保鲜消毒领域的应用 [J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3795–3802.
- [QI M, LUO Z S, WANG L, et al. Application of slightly acidic electrolyzed water in food preservation and disinfection [J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2020, 11(12): 3795–3802.]
- [6] 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.
- [7] 张秋婷, 林素丽, 朱松明, 等. 超高压与微酸性电解水结合对鲜切果蔬的杀菌效果研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 338–344. [ZHANG Q T, LIN S L, ZHU S M, et al. Combined effect of high pressure and slightly acidic electrolyzed water on sterilization of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 338–344.]
- [8] YE Z Y, WANG S, CHEN T, et al. Inactivation mechanism of *Escherichia coli* induced by slightly acidic electrolyzed water [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6279.
- [9] 许瀛引, 谢丽源, 张志远, 等. 微酸性电解水和紫外光结合对采后六味羊肚菌的保鲜作用 [J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3332–3346. [XU Y Y, XIE L Y, ZHANG Z Y, et al. Combined effects of slightly-acidic electrolyzed water and ultraviolet light on the postharvest quality of *Morchella sextelata* [J]. Mycosistema, 2021, 40(12): 3332–3346.]
- [10] LI L L, MU T H, ZHANG M. Contribution of ultrasound and slightly acid electrolytic water combination on inactivating *Rhizopus stolonifer* in sweet potato [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105528.
- [11] 支欢欢, 刘琦琦, 徐娟, 等. 微酸电解水结合不同钙源处理改善“尖脆”枣果实采后货架品质 [J]. 现代食品科技, 2018, 34(9): 45–50, 214. [ZHI H H, LIU Q Q, XU J, et al. Slightly acidic electrolyzed water in combination with different calcium sources improved storage quality of ‘Jiancui’ jujube fruit during shelf life storage [J]. Modern Food Science & Technology, 2018, 34(9): 45–50, 214.]
- [12] LI L Z, SONG S H, NIRASAWA S, et al. Slightly acidic electrolyzed water treatment enhance the main bioactive phytochemicals content in broccoli sprouts via changing metabolism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(2): 606–614.
- [13] HU H L, LUO S F, AN R H, et al. Endogenous melatonin delays sepal senescence and extends the storage life of broccoli florets by decreasing ethylene biosynthesis [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 188: 111894.
- [14] 张秋萍, 吴霞红, 郑剑恒, 等. 生物样本中丙二醛测定方法的研究进展 [J]. 理化检验(化学分册), 2016, 52(8): 979–985.
- [ZHANG Q P, WU X H, ZHENG J H, et al. Progress of researches on methods for determination of malondialdehyde in biological samples [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B (Chemical Analysis), 2016, 52(8): 979–985.]
- [15] RIZZOLO A, GRASSI M, VANOLI M. 1-Methylcyclopropene application, storage temperature and atmosphere modulate sensory quality changes in shelf-life of ‘Abbé fétel’ pears [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 87–97.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB/T 4789.2-2010 食品卫生微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1–7. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 4789.2-2010 Microbiological examination of food hygiene. Determination of total bacterial count [S]. Beijing: China Standards Press, 2010: 1–7.]
- [17] 杨丽, 麦振龙, 朱良, 等. 果蔬中维生素 C 含量的测定方法比较与优化 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 232–233, 236. [YANG L, MAI Z L, ZHU L, et al. Comparison and optimization of determination methods of vitamin C content in fruits and vegetables [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 232–233, 236.]
- [18] 刘红锦, 胡花丽, 李鹏霞, 等. 不同气体组合对杏果实贮藏品质的影响 [J]. 江苏农业学报, 2009, 25(4): 885–889. [LIU H J, HU H L, LI P X, et al. Effects of O₂ and CO₂ concentrations on the storage quality of apricot fruit [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 25(4): 885–889.]
- [19] 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.
- [20] 葛剑, 杨翠军, 刘贵河, 等. 晾晒和添加剂对紫花苜蓿青贮发酵品质和营养成分的影响 [J]. 江苏农业学报, 2014(3): 595–601. [GE J, YANG C J, LIU G H, et al. Effects of wilting and additives on fermentation quality and feeding value of *Medicago sativa* silages [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014(3): 595–601.]
- [21] 初婷, 彭畅, 郭丽萍. MgSO₄ 处理对西兰花芽苗菜生理活性物质和抗氧化能力的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(11): 53–59. [CHU T, PENG C, GUO L P. Effect of MgSO₄ treatment on bioactive compounds and antioxidant activity in broccoli sprouts [J]. Food Science, 2018, 39(11): 53–59.]
- [22] GUO L, YANG R, WANG Z, et al. Glucoraphanin, sulforaphane and myrosinase activity in germinating broccoli sprouts as affected by growth temperature and plant organs [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 9: 70–77.
- [23] 中华人民共和国卫生部. GB/5009.33-2010 食品中亚硝酸盐

- 与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 1-8. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/5009.33-2010 Determination of nitrite and nitrate in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2003: 1-8.]
- [24] PATRIGNANI F, VANNINI L, KAMDEM S L S. Potentialities of high-pressure homogenization to inactivate *Zygosaccharomyces bailii* in fruit juices[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): M116-M120.
- [25] 胡朝晖, 吴彤娇, 李慧颖, 等. 微酸性电解水用于鲜切莲藕杀菌处理的实验研究[J]. 河北工业科技, 2016, 33(1): 40-45. [HU Z H, WU T J, LI H Y, et al. Experimental study on the disinfection of fresh-cut lotus root using slightly acidic electrolyzed water[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2016, 33(1): 40-45.]
- [26] 唐志龙, HAMZAH A, 高晴, 等. 微酸性电解水凝胶对天麻鲜切片贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2625-2632. [TANG Z L, HAMZAH A, GAO Q, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water gel on the storage quality of fresh slices of *Gastrodia elata*[J]. *Food Safety and Quality Detection Technology*, 2022, 13(8): 2625-2632.]
- [27] 马阳历, 张玉笑, 郭衍银, 等. 气调过程中 O₂ 含量对西兰花叶绿素降解的影响[J]. 北方园艺, 2021(23): 98-105. [MA Y L, ZHANG Y X, GUO Y Y, et al. Effects of O₂ content on the chlorophyll degradation in broccoli heads under controlled atmospheres[J]. *Northern Horticulture*, 2021(23): 98-105.]
- [28] 张雪, 赵明, 王晶, 等. 温度对鲜切西兰花贮藏保鲜的影响[J]. 化学与黏合, 2019, 41(1): 46-48, 67. [ZHANG X, ZHAO M, WANG J, et al. Effect of temperature on storage and preservation of fresh-cut broccoli[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2019, 41(1): 46-48, 67.]
- [29] 桑煜, 张慤, 肖卫民. 真空处理对蔬菜减压贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(1): 70-75. [SANG Y, ZHANG M, XIAO W M. Effect of hypobaric storage on preservation of three kinds of vegetables[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2018, 37(1): 70-75.]
- [30] TECHAVUTHIPORN C, THAMMAWONG M, NAKANO K. Effect of short-term anoxia treatment on endogenous ethanol and postharvest responses of broccoli florets during storage at ambient temperature[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 277: 109813.
- [31] 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/OL]. 食品科学, 2022, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220613.1239.133.html>. [ZHAO A Q, AN R H, WANG X Y, et al. Effect of atomized slightly acidic electrolyzed water treatment in vacuum pre-cooling on the quality of postharvest Chinese little greens during low temperature circulation and shelf[J/OL]. *Food Science*, 2022, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220613.1239.133.html>.]
- [32] 刘红艳, 胡花丽, 罗淑芬, 等. 6-苄氨基嘌呤处理对鲜切西兰花品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(1): 186-193. [LIU H Y, HU H L, LUO S F, et al. Effects of 6-benzylaminopurine treatments on the quality of fresh-cut broccoli[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(1): 186-193.]
- [33] 龚春燕, 苏娜娜, 陈沁, 等. 不同光质对西兰花芽苗菜营养品质及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(23): 42-49. [GONG C Y, SU N N, CHEN Q, et al. Effects of different light quality on nutritional quality and antioxidant activity of broccoli sprouts[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(23): 42-49.]
- [34] 马冉冉, 袁洁, 张文洁, 等. 堆放时间对西兰花尾菜青贮品质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(9): 2107-2114. [MA R R, YUAN J, ZHANG W J, et al. Effects of stacking time on feeding and fermentation quality of broccoli waste[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 2107-2114.]
- [35] 李慧颖, 李嘉欣, 郝建雄. 微酸性电解水对溶液体系中有机磷农药的降解机制及途径分析研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(5): 1906-1913. [LI H Y, LI J X, HAO J X. Study on the degradation mechanism and pathway of chlorpyrifos by slightly acidic electrolyzed water in aqueous system[J]. *Food Safety and Quality Detection Technology*, 2021, 12(5): 1906-1913.]