

赵雅琦, 宁明岸, 左进华, 等. UV-C 处理对人参果贮藏期冷害及风味品质的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 87-96.
ZHAO Yaqi, NING Ming'an, ZUO Jinhua, et al. Effect of UV-C treatment on chilling injury and flavor quality of *Solanum muricatum* fruit during storage[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(5): 87-96.

UV-C 处理对人参果贮藏期冷害及风味品质的影响

赵雅琦^{1,2}, 宁明岸^{1,2}, 左进华², 史君彦^{2,3}, 时文林^{1,2}, 黄玉咪¹, 王 清², 封碧红¹
(1 广西大学 农学院, 广西南宁, 530000; 2 北京市农林科学院蔬菜研究中心/农业农村部蔬菜产后处理重点实验室/
果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室/农业农村部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室/农业农村部
都市农业(北方)重点实验室, 北京, 100097; 3 北京林业大学 生物科学与技术学院, 北京, 100083)

摘要:【目的】研究 UV-C 处理对人参果 *Solanum muricatum* 贮藏期间冷害及风味变化的影响, 以期为人参果的采后贮藏保鲜及防止低温冷害提供新的技术手段及理论依据。【方法】将人参果置于不同温度 (0、5、10、15、20 ℃) 下贮藏 15 d, 通过测定贮藏期间的冷害指数、感官品质、呼吸强度和乙烯释放量的变化, 验证人参果在 5 ℃ 及以下贮藏会发生冷害。采用 0.25、0.50 和 1.00 kJ·m⁻² 剂量的 UV-C 处理人参果, 在 5 ℃ 冷库中贮藏 15 d, 测定贮藏期间其冷害及风味品质的变化, 并结合电子鼻测定风味物质的变化情况。【结果】在 5 ℃ 冷胁迫下, 不同剂量的 UV-C 处理均有效地保持了人参果的风味品质, 减轻了三参果的冷害症状, 抑制了三参果在低温下的呼吸强度和乙烯释放量。在贮藏第 15 天, 1.00 kJ·m⁻²UV-C 处理组乙烯释放量比对照组低 46%, 1.00、0.50 和 0.25 kJ·m⁻² UV-C 处理组的冷害指数分别为 30%、70% 和 67%, 均显著低于对照组 (81%), 且 1.00 kJ·m⁻² UV-C 处理将冷害的发生时间推迟了 6 d。通过线性判别法和雷达图分析发现, 不同剂量的 UV-C 处理均保持人参果较好的挥发性香气成分。【结论】在冷胁迫下, 不同剂量的 UV-C 处理均明显减轻人参果的冷害症状, 不同程度地保持了人参果贮藏期的风味品质, 延缓衰老; 与其他处理相比, 1.00 kJ·m⁻² UV-C 处理的人参果在贮藏期间冷害指数较低, 处理效果最佳。

关键词: 人参果; UV-C 辐照; 冷害; 乙烯; 电子鼻
中图分类号: S379.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2021)05-0087-10

Effect of UV-C treatment on chilling injury and flavor quality of *Solanum muricatum* fruit during storage

ZHAO Yaqi^{1,2}, NING Ming'an^{1,2}, ZUO Jinhua², SHI Junyan^{2,3}, SHI Wenlin^{1,2},
HUANG Yumi¹, WANG Qing², FENG Bihong¹
(1 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530000, China; 2 Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Key Laboratory of Vegetable Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Beijing Key Laboratory of Fruits and Vegetable Storage and Processing/ Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Urban Agriculture(North), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China; 3 College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】To study the effects of UV-C treatment on chilling injury and flavor changes of pepino (*Solanum muricatum*) fruit during storage, and provide a new technique and theoretical basis for postharvest

收稿日期: 2020-10-25 网络首发时间: 2021-06-28 15:59:48
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210628.1502.004.html>
作者简介: 赵雅琦 (1996—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1984562763@qq.com; 通信作者: 王 清 (1979—), 女, 研究员, 博士, E-mail: wangqing@nercv.org; 封碧红 (1975—), 女, 讲师, 博士, E-mail: 160390074@qq.com
基金项目: 广西自然科学基金 (2018GXNSFAA281207); 北京市科技计划 (Z181100009618033); 国家大宗蔬菜产业体系技术项目 (CARS-23); 北京市农林科学院协同创新中心建设项目 (KJCX201915)

storage and chilling injury prevention of pepino fruit. 【Method】 Pepino fruits were stored at different temperatures (0, 5, 10, 15, 20 °C) for 15 days, and the changes in chilling injury index, sensory quality, respiration intensity, and ethylene production during storage were measured to verify pepino fruits would have chilling injury when stored at 5 °C and below. Further pepino fruits were treated with UV-C at doses of 0.25, 0.50 and 1.00 kJ·m⁻² respectively, and stored at 5 °C for 15 days. The changes in chilling injury and flavor quality during storage were measured, combining with measurement of the changes of flavor substances using the electronic nose. 【Result】 Under 5 °C cold stress, the different doses of UV-C treatment effectively maintained the flavor quality, alleviated the symptoms of chilling injury and inhibited the respiration intensity and ethylene production at low temperature of pepino fruits. The ethylene production of 1.00 kJ·m⁻² UV-C treatment was 46% lower than that of the control group on the 15th day of storage, and the chilling injury index of 1.00, 0.50 and 0.25 kJ·m⁻² UV-C treatments were 30%, 70% and 67% respectively, which were significantly lower than that of the control group (81%). The 1.00 kJ·m⁻² UV-C treatment could significantly delay the onset of chilling injury for six days. Through linear discriminant analysis and radar analysis, it was found that the different doses of UV-C treatment kept the volatile aroma components of pepino fruits well. 【Conclusion】 Under cold stress, the different doses of UV-C treatment could significantly decrease the symptoms of chilling injury, maintain the flavor quality during storage to varying degrees, and delay the senescence of pepino fruits. Compared with other treatments, pepino fruits treated with 1.00 kJ·m⁻² UV-C have lower chilling injury index during storage and the treatment effect is the best.

Key words: pepino fruit; UV-C irradiation; chilling injury; ethylene; electronic nose

人参果 *Solanum muricatum* 是原产于南美洲的一种草本植物，成熟时果皮带有明显的紫色条纹。人参果果肉含有丰富的维生素 C 和硒、钼、铜、锌、铁等微量元素^[1-3]，具有较高的营养价值，而且还含有丰富的酯类、醛类和醇类等挥发性物质，使其具有淡雅的香气，风味独特^[4]。但是，人参果采后不易储运，且贮藏期间经常由于处理不当、贮藏温度不适宜等原因，导致果实感官品质降低、风味变差，甚至发生腐烂变质，不符合消费者的购买标准^[5-7]，严重影响其商品价值和经济价值。低温可有效地延长果实的贮藏期^[8]，但人参果属于冷敏型果蔬，在 5 °C 及以下的温度中贮藏，果实会发生冷害，导致果实表面凹陷损伤和内部变色，且影响其风味品质^[9]。目前研究发现，壳聚糖涂膜^[10]、外源乙烯^[11]、气调贮藏^[12]等方法对人参果有较好的保鲜效果，但是关于改善人参果采后冷害和风味变化的研究鲜有报道。

短波紫外线 (Ultraviolet-C light, UV-C, 波长小于 280 nm) 处理是一种安全、简单、无化学残留的采后处理技术，研究发现 UV-C 处理可以提高花椰菜、番茄、青椒、苹果等^[13-16]采后贮藏品质，延缓果蔬衰老，还可以减轻黄瓜^[17]、山药^[18]、水蜜桃^[19]等果

实的冷害症状。但是关于 UV-C 处理对人参果冷害发生和风味变化影响的研究鲜有报道，因此本试验研究了不同剂量的 UV-C 处理对人参果冷害及风味变化的影响。

目前，电子鼻、气相色谱和质谱联用等^[20]技术是研究果实香气的有效方式。电子鼻，也是人工嗅觉系统，与气相色谱法、质谱法等相比，可以无损检测果实的整体香气，具有操作简单、方便快捷等优点^[21]，曾被广泛应用于水果、蔬菜、肉类、茶叶、海产品等香气成分的检测和分析^[22-25]。本试验通过研究不同剂量 UV-C 处理对人参果采后冷害和风味变化的影响，以期为人参果的采后贮藏保鲜及低温冷害控制技术的研究提供新的思路和见解。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

人参果品种为‘长丽’，种植地点为甘肃省武威市民勤县 (E103.08°; N38.62°)，采后将每个果实套上低密度聚乙烯材质的包装网套，然后装箱立即空运回实验室，挑选成熟度一致，大小均一，表面无机械损伤、无病虫害的果实作为试验材料。

0.03 mm 厚的聚乙烯保鲜袋购于北京华盾雪花

有限公司; PEN3 型便携式电子鼻购于德国 Airsense 公司; GXH-3052L 型便携式排气分析仪购于北京均方理化科技研究所; 安捷伦 7820A 气相色谱仪购于美国安捷伦公司。

1.2 试验方法

预试验: 通过预试验以确定会导致人参果发生冷害现象的贮藏温度。试验处理前, 从所有挑选好的人参果中随机取出 9 个作为初始对照组, 测定各项指标初始值, 之后将挑选好的人参果分装于聚乙烯保鲜袋中, 每袋装 36 个, 分别放在 0、5、10、15、20 ℃ 的冷库中贮藏 15 d, 湿度为 85%~90%, 每个不同温度中放置 3 袋人参果作为重复, 取样时每 3 个果实为 1 组。每天进行观察, 每 3 d 取样测定各项指标。

UV-C 处理: 试验处理前, 从所有挑选好的人参果中随机取出 9 个作为初始对照组, 测定各项指标初始值, 之后将挑选好的人参果均分为 4 组, 分别

用 0.25、0.50 和 1.00 kJ·m⁻² 剂量的 UV-C 辐照处理, 对照组不做任何处理, 然后每组处理的果实分装于聚乙烯保鲜袋中, 每袋装 36 个, 于 5 ℃ 的冷库中贮藏 15 d, 湿度为 85%~90%, 每个处理都准备 3 袋人参果作为重复, 取样时每 3 个果实为 1 组。每 3 d 取样测定各项指标。

1.3 指标测定方法

1.3.1 冷害指数 人参果的冷害首先在果肉中的表现为与果皮褐变相关的果肉成半透明状, 之后果皮上呈现褐斑^[25]。采用 Domingo 等^[26] 方法稍作修改, 由 9 个经过培训的专业人员组成的评定小组, 对不同时间点的冷害发生情况进行评定, 评定标准为非冷害 0 分、较轻微 1 分、轻微 2 分、中度 3 分和严重 4 分, 参照图片如图 1 所示, 冷害指数计算公式如下所示:

冷害指数 = $\frac{\sum(\text{冷害级数} \times \text{该级果实数})}{(\text{冷害最高级数} \times \text{果实总数})} \times 100\%$



图 1 人参果冷害指数判定参考图片

Fig. 1 Reference picture for judgment of chilling injury index of pepino fruit

1.3.2 感官评分 采用 Pluda 等^[27] 的方法稍作修改, 使用排名法进行风味评估, 每个处理随机取出 3 个人参果, 每个人参果切成同等大小的 3 块, 并作标记。9 个经过培训的品尝者对不同处理中的人参果进行排名, 品尝者根据总体风味、质地对人参果切片进行排名, 使用 1(差)、2(一般) 和 3(好) 进行评分。

1.3.3 呼吸强度和乙烯释放量 呼吸强度测定参照刘泽松等^[28] 的方法, 采用气体分析仪进行测定, 测定时长为 1 h, 结果以 CO₂ 计, 单位为 mg·kg⁻¹·h⁻¹。

乙烯释放量的测定采用范林林等^[29] 的方法, 将人参果放入带有抽气口的密封容器中 1 h, 顶空抽取 1 mL 气体, 注入安捷伦 7820A 气相色谱仪。仪器设置: 载气压力 0.5 MPa, 氮气流量 30 mL·min⁻¹; 辅助气压力 0.4 MPa, 氢气流量 50 mL·min⁻¹; 空气压力 0.4 MPa, 流量 550 mL·min⁻¹; 进样器温度 100 ℃, 柱温 60 ℃。检测室温度 200 ℃, 进样方式不分流进样, 1 min 后打分流阀。最后根据乙烯峰面积与乙

烯浓度的线性关系计算乙烯释放量, 单位为 μL·kg⁻¹·h⁻¹。

1.3.4 电子鼻检测 电子鼻检测采用刘瑶等^[30] 的方法稍加修改。将人参果 3 个为 1 组放置在 7 L 的密闭容器中, 于相应的贮藏温度中静置 30 min 后采用顶空吸气法进行电子鼻数据采集。测定条件为: 传感器流速 100 mL·min⁻¹, 清洗时间 80 s, 自动调零 5 s, 样品准备时间和检测时间分别为 5 和 120 s, 测量前后, 均对传感器进行清洗和标准化, 使其基本恢复到初始状态。每个处理组重复 3 次。多次预试验发现传感器响应在 110 s 趋于稳定, 所以选择 115、116 和 117 s 的数据进行后续分析。PEN3 型便携式电子鼻传感器性能见表 1。

1.4 数据分析与处理

利用仪器自带的 Win muster 分析软件, 采用线性判别法 (Linear discriminant analysis, LDA) 和负荷加载分析法对数据进行分析。利用 SPSS 17.0 软件对数据进行最小差异显著性 (Least significant difference, LSD) 分析, 相关性利用皮尔森积差相关法进行分析, 利用 Origin 软件作图。

表 1 PEN3 型便携式电子鼻标准传感器阵列与性能

Table 1 Standard sensor arrays and performance of PEN3 electronic nose

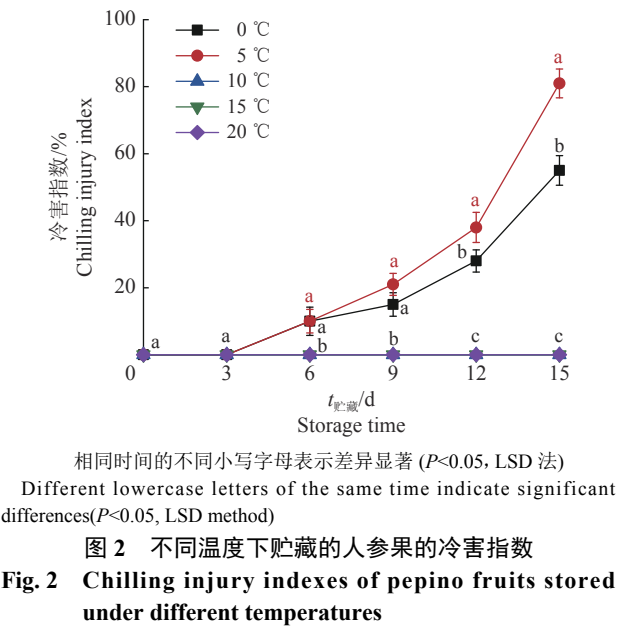
传感器编号 Sensor number	传感器名称 Sensor name	主要敏感化合物 Major sensitive compounds
S1	W1C	芳香族有机化合物 Aromatic organic compounds
S2	W5S	氮氧化合物 Nitrogen oxides
S3	W3C	氨类、芳香成分 Ammonia, aromatic compounds
S4	W6S	氢化物 Hydrogen
S5	W5C	短链烷烃、芳香成分 Short chain alkanes, aromatic compounds
S6	W1S	甲基类化合物 Methyl compounds
S7	W1W	无机硫化物 Inorganic sulfide
S8	W2S	醇类 Alcohols
S9	W2W	有机硫化物、芳香成分 Organic sulfide, aromatic compounds
S10	W3S	长链烷烃 Long chain alkanes

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对人参果冷害及风味品质的影响

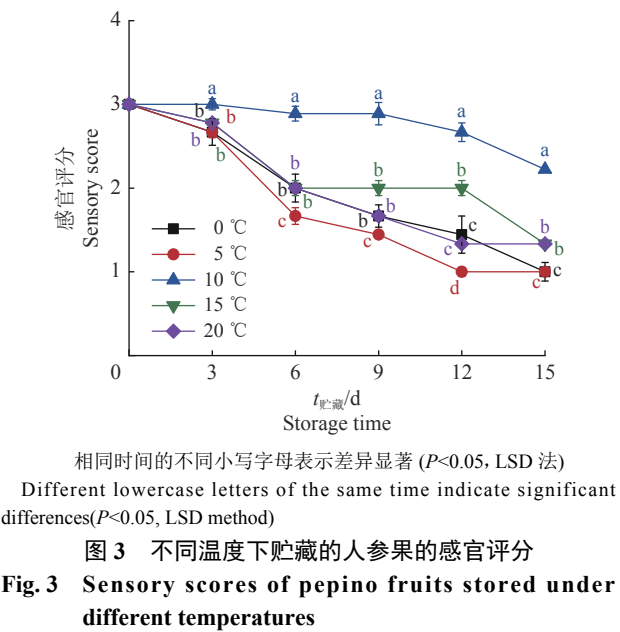
2.1.1 不同贮藏温度对人参果冷害指数的影响

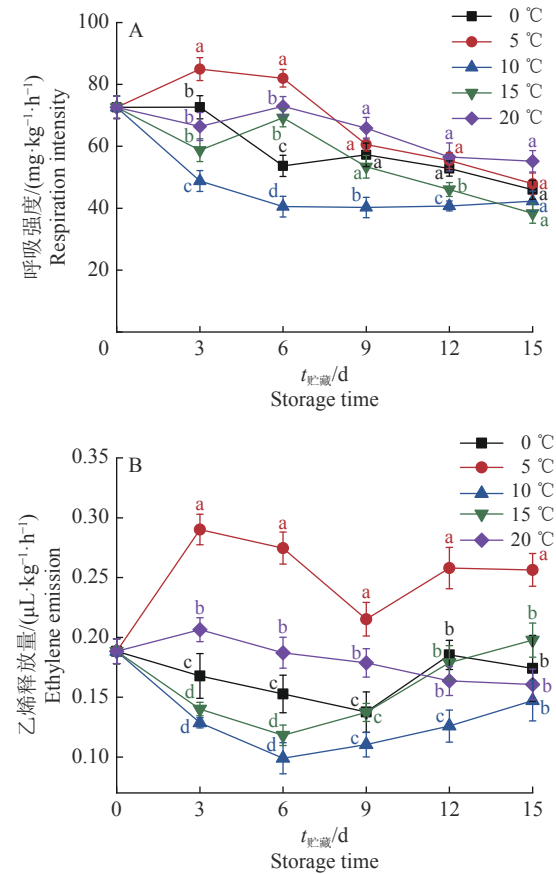
人参果在低温下贮藏易遭受冷害，冷害最直观的症状是果皮上出现褐斑^[11]。由图 2 可知，10、15 和 20 ℃ 的贮藏条件下，人参果贮藏 15 d 无冷害发生。而在 0 和 5 ℃ 贮藏条件下，在贮藏第 6 天均观察到明显的冷害症状，随着贮藏时间的延长，冷害指数逐渐升高。而且 5 ℃ 条件下人参果的冷害指数在贮藏第 9~15 天高于 0 ℃ 处理组，在贮藏第 15 天，5 ℃ 条件下人参果冷害指数为 81%，较 0 ℃ 处理组高 26% ($P<0.05$)，因此人参果在 5 ℃ 的贮藏条件下易发生冷害，且冷害发展最为迅速。



2.1.2 不同贮藏温度对人参果感官评分的影响

由图 3 可知，各处理组人参果的感官评分随着贮藏时间的延长逐渐下降。在整个贮藏期，10 ℃ 贮藏的人参果的感官评分始终显著高于其他处理组 ($P<0.05$)，且下降速度较为缓慢，在贮藏期第 6~12 天，5 ℃ 贮藏的人参果感官评分显著低于其他处理组 ($P<0.05$)，在贮藏第 15 天，5 ℃ 贮藏的人参果感官评分仅为 1，15 和 20 ℃ 贮藏的人参果感官评分为 1.3，但 10 ℃ 贮藏人参果的感官评分为 2.2。由此可知，5 ℃ 贮藏的人参果易遭受冷胁迫，且会降低人参果贮藏期的风味和质地等，从而降低其商品价值，而 10 ℃ 条件下贮藏则可以更好地保持人参果贮藏期的风味品质。





相同时间的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
Different lowercase letters of the same time indicate significant differences ($P<0.05$, LSD method)

图4 不同温度下贮藏的人参果的呼吸强度和乙烯释放量
Fig. 4 Respiration intensities and ethylene emission in pepino fruits stored under different temperatures

2.1.3 不同贮藏温度对人参果呼吸强度和乙烯释放量的影响 由图4A可知,随着贮藏时间的延长,人参果的呼吸强度总体呈先升高后下降的趋势。在0和5℃贮藏的第3天,呼吸强度达到峰值,且显著高于其他处理组 ($P<0.05$),然后下降,这可能是与0和5℃贮藏的人参果遭受冷害有关。在15和20℃贮藏的第6天呼吸强度达到高峰,之后缓慢下降,但是在10℃贮藏的第6天开始平稳上升,且在贮藏期第3~12天显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。由图4B中可知,5℃贮藏的人参果的乙烯释放量变化趋势和呼吸强度大致相同,都呈先升高再下降的趋势,且显著高于其他处理组 ($P<0.05$)。这说明人参果在冷害条件下产生乙烯,由于5℃下冷害现象高于0℃处理组,因此5℃条件下人参果乙烯释放量最高。此外,在20℃贮藏的第3天乙烯释放量达到了峰值后平稳下降,而15和10℃处理组先缓慢下降,从第6天开始平稳上升,且在10℃贮藏的人参果乙烯释放量保持在较低水平,这说明10~20℃条件下,低温可抑制人

参果的成熟和衰老。综上所述,人参果在5℃贮藏条件下冷害的发生增强了呼吸强度,增加了乙烯释放量。

2.1.4 不同贮藏温度对人参果风味变化的影响 采用电子鼻检测每个处理人参果的风味变化,获得其电子鼻10个传感器的响应图,如图5A所示,每条传感器都有不同的响应曲线,随着检测时间的延长,挥发物在传感器表面富集,相对电阻值不断增大,最后趋于平缓。其中W1W(无机硫化物)、W2W(有机硫化物、芳香成分)、W5S(氮氧化合物)较其他传感器有较高的相对电阻率值,说明人参果挥发性香气成分中硫化物、芳香类和氮氧化合物较多。

传感器的载荷分析主要显示对特定气味的分辨力,靠近中心0位置的传感器贡献率最低,远离中心位置的贡献率较高^[31-32]。由图5B可知,主轴1(Lo1)和主轴2(Lo2)的总贡献率为97.4%,可以起到分辨气味的作用。其中W1W(无机硫化物)、W2W(有机硫化物、芳香成分)、W5S(氮氧化合物)贡献率较大,其次为W1S(甲基类化合物)和W2S(醇类),表明人参果在贮藏期间的挥发性芳香成分主要有硫化物、芳香类、氮氧化合物和醇类等。其中,W2S主要对醇类物质敏感,而与人参果成熟度相关的主要是3-甲基-2-丁烯-1-醇和3-甲基-3-丁烯-1-醇^[6]。

研究发现,人参果主要挥发性成分是醇类和酯类物质,在成熟过程中醇类物质会不断地转化为酯类物质增加果实令人愉悦的香气^[4,6]。为了更好地研究不同贮藏温度对果实风味的影响,采用雷达图进行分析。由图5C可知,人参果在0、5、10、15、20℃贮藏第15天的挥发性物质与初值相比发现,5℃贮藏第15天可检测到较多的无机硫化物(W1W)、氮氧化合物(W5S)和醇类(W2S)等挥发性物质,这可能是因为5℃条件下果实冷害发生最为严重,破坏了细胞膜的完整性更利于释放出醇、硫化物、醛等挥发性成分,产生不良的风味,影响其品质。

为进一步分析人参果的冷害指数和各个传感器检测的挥发性风味物质(传感器的相对电阻率反映丰度)、呼吸强度以及乙烯释放量之间的关系,对0和5℃贮藏的人参果测定的指标进行了相关性分析,如图5D所示,结果发现,冷害指数和呼吸强度呈极显著负相关 ($P<0.01$),乙烯释放量和W1S(甲基类化合物)的相对电阻率呈极显著负相关 ($P<0.01$),冷害指数和10个传感器的相对电阻率之间无显著相关性。因此,呼吸强度与果实冷害的发生密切相关。综上所述,人参果在5℃的贮藏条件下易发生冷害,且冷害发展最为迅速。

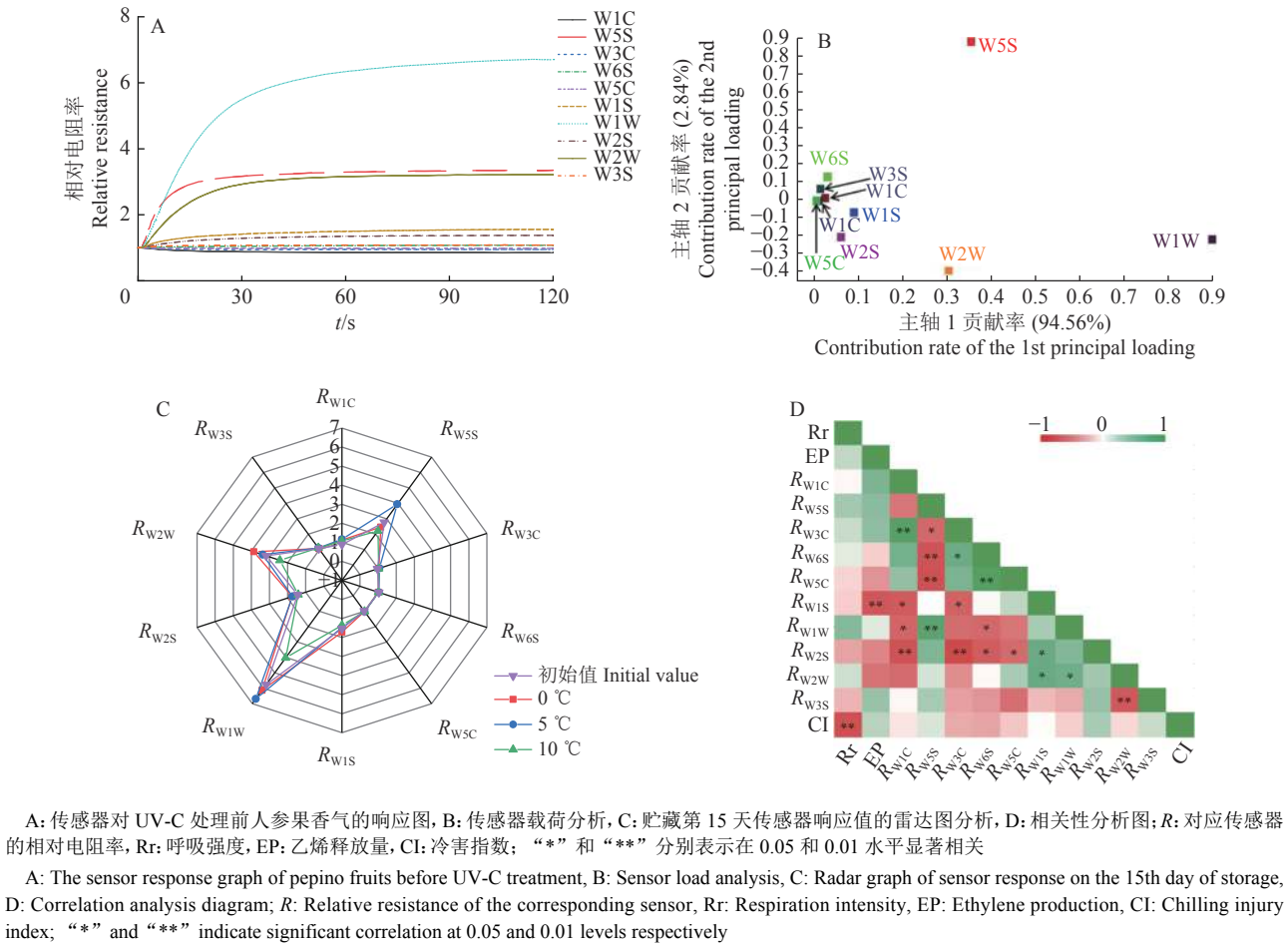


图 5 不同贮藏温度下的人参果电子鼻数据分析

Fig. 5 Analysis of electronic nose data for pepino fruits under different storage temperatures

2.2 UV-C 处理对人参果贮藏期冷害及风味品质的影响

2.2.1 UV-C 处理对人参果贮藏期冷害指数的影响 冷害指数是果实冷害程度和冷藏品质的直接表现统计^[32]。由图 6 可知, 0.25、0.50 kJ·m⁻² 剂量的 UV-C 处理组和对照组均在贮藏第 6 天观察到明显的冷害症状, 而 1.00 kJ·m⁻² 处理组在贮藏第 12 天出现明显的冷害症状, 且冷害指数显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。贮藏至第 15 天时, 1.00、0.50 和 0.25 kJ·m⁻² 处理组的冷害指数分别为 30%、70%、67%, 均显著低于对照组 (81%) ($P<0.05$)。这说明, 与对照组相比, 不同剂量的 UV-C 处理均能有效缓解人参果冷害, 其中 1.00 kJ·m⁻² UV-C 处理可将冷害发生时间推迟 6 d。

2.2.2 UV-C 处理对人参果贮藏期感官评分的影响 由图 7 可知, 各处理组人参果的感官评分随着贮藏时间的延长逐渐降低, 其中 1.00 kJ·m⁻² UV-C 处理组下降最缓慢, 且显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。和对照组相比, 在贮藏期第 6~9 天, 0.50 和 0.25 kJ·m⁻² 处理组人参果的感官品质显著

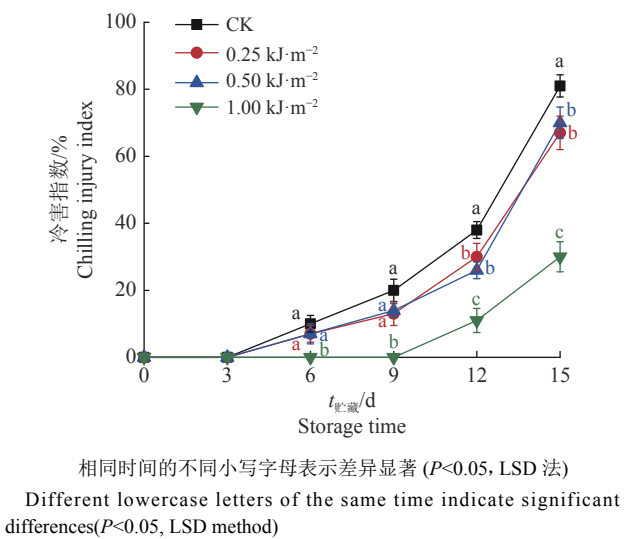
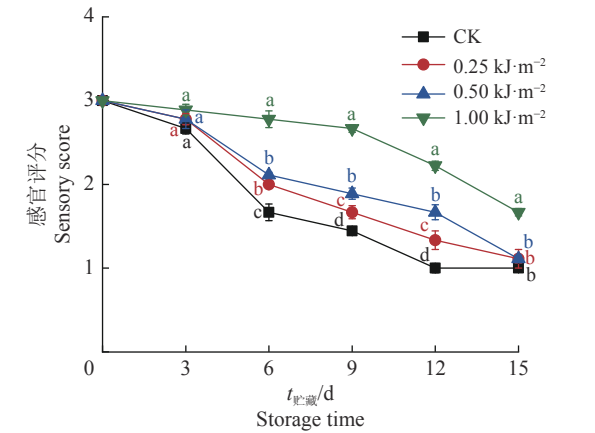


图 6 不同剂量 UV-C 处理后的人参果的冷害指数

Fig. 6 Chilling injury indexes of pepino fruits treated by different doses of UV-C

升高。在贮藏期第 15 天时, 1.00 kJ·m⁻² 处理组人参果的感官评分为 1.6, 而其他处理组的感官评分在 1 至 1.1 之间, 表明 UV-C 可以保持冷胁迫下人参果的贮藏品质, 其中 1.00 kJ·m⁻² UV-C 处理效果最好。

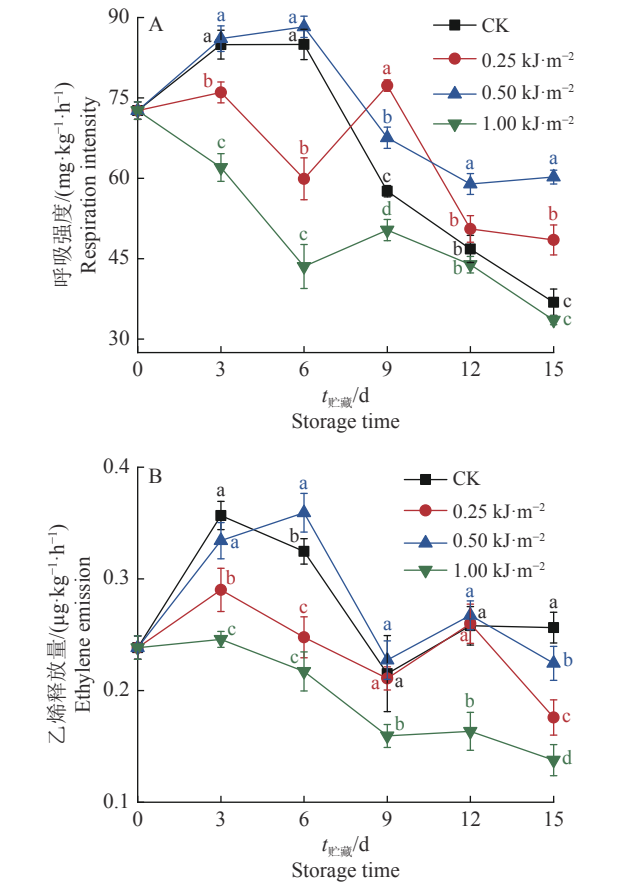


相同时间的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
Different lowercase letters of the same time indicate significant differences ($P<0.05$, LSD method)

图 7 不同剂量 UV-C 处理后的人参果的感官评分
Fig. 7 Sensory scores of pepino fruits treated by different doses of UV-C

2.2.3 UV-C 处理对人参果贮藏期间呼吸强度和乙烯释放量的影响 由图 8A 可知, 在贮藏期间, 0.50、0.25 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ UV-C 处理组和对照组的人参果呼吸强度总体保持先升高后下降的趋势。与其他处理组相比, 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组的人参果在整个贮藏期间呼吸强度保持较低的水平, 总体呈下降的趋势, 在贮藏至第 9 天时出现升高的趋势, 这可能与此组果实将发生冷害相关。由图 8B 可知, 各处理组人参果的乙烯释放量均呈先上升后下降的趋势。0.50 和 0.25 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组的人参果乙烯释放量在贮藏第 6 天和第 15 天均显著低于对照组 ($P<0.05$), 而 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组在整个贮藏期间均显著低于对照组 ($P<0.05$), 在贮藏第 15 天, 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组乙烯释放量较对照组低 46%。说明不同剂量的 UV-C 辐照均可抑制人参果贮藏期间的呼吸强度和乙烯释放量, 其中 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组的效果最佳。

2.2.4 UV-C 处理后人参果贮藏期间 LDA 分析和雷达图分析 LDA 即将原始数据映射到低维的方



相同时间的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
Different lowercase letters of the same time indicate significant differences ($P<0.05$, LSD method)

图 8 不同剂量 UV-C 处理后的人参果的呼吸强度和乙烯释放量
Fig. 8 Respiration intensities and ethylene emission of pepino fruits treated by different doses of UV-C

向, 以响应值的空间分布状态即彼此之间的投影距离表现出组与组之间的关系, 更直观地观察到组与组之间分类情况^[31]。由图 9 可知, 在 5 °C 贮藏的第 3 天和第 15 天, 第一判别式贡献率 (LD1)、第二判别式贡献率 (LD2) 之和分别为 98.79% 和 97.06%, 2 个判别式的贡献率大于 95%, 说明可以判别各处

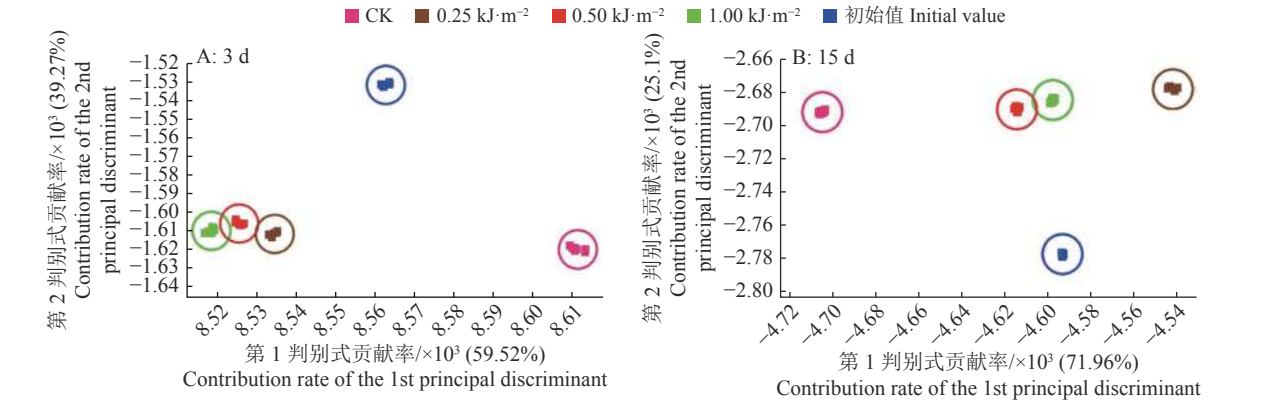


图 9 不同剂量 UV-C 处理后人参果贮藏第 3、15 天的 LDA 分析
Fig. 9 LDA analysis on pepino fruits stored for 3 and 15 days after UV-C treatment at different doses

理组分类情况。在贮藏第 3 天和第 15 天, UV-C 处理组 and 对照组之间无重叠区域, 且对照组相距初始值较远 (距离越大表明变化越快、越明显), 这说明在贮藏第 3 天和第 15 天, UV-C 处理与对照组分析结果具有高区分度。0.25 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组与 0.50 和 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组间亦有差异, 但 0.50 和 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 处理组间无明显区分度。结合图 10 可知, 各处理组间的 10 个传感器响应值之间差异较大的是 W1W(无机硫化物)、W2W(有机硫化物和芳香成分) 和 W5S(氮氧化合物), 这说明人参果在低温条件下贮藏, 挥发性风味物质的变化主要是硫化物、芳香成分和氮氧化合物, 对照组在贮藏第 15 天硫化物 (W1W) 丰度变化最为显著, 说明冷害对组织细胞破坏严重, 导致硫化物等挥发性成分的形成,

产生不良风味, 进而影响产品的感官品质。在贮藏第 15 天, UV-C 处理组 (0.25、0.50 和 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) 无机硫化物 (W1W)、有机硫化物和芳香成分 (W2W)、氮氧化合物 (W5S) 丰度变化与初值稍有差异, 但是 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ UV-C 处理的人参果挥发性风味物质丰度与初始值相似, 这可能是因为不同剂量的 UV-C 处理延缓人参果贮藏期间冷害发生速率的差异所致, UV-C 处理可延缓人参果冷藏期间挥发性风味物质的变化, 尤其是无机硫化物的生成, 其中 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 UV-C 处理保持其风味效果最佳。

2.2.5 测量指标间的相关性分析 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ UV-C 处理组和对照组中各指标之间的相关性分析如图 11 所示。由图 11 可知, UV-C 处理组和对照组中 W3C(氨类和芳香成分) 和 W1C(芳香族有机化合

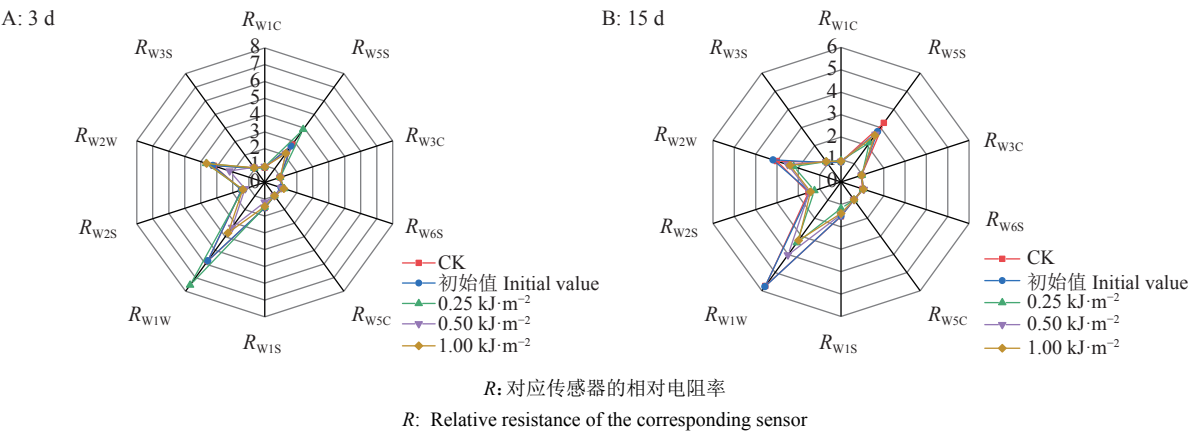


图 10 不同剂量 UV-C 处理后人参果贮藏第 3、15 天的雷达图分析

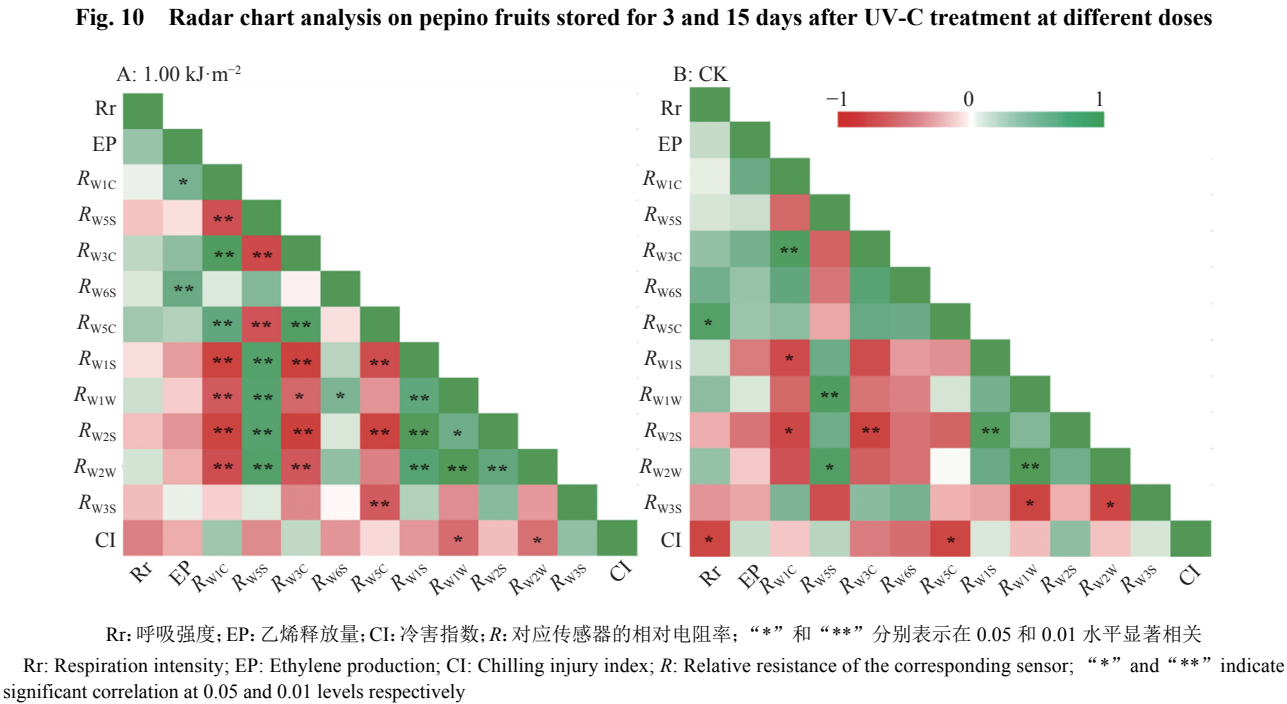


图 11 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ UV-C 和对照处理人参果在贮藏期间测量指标之间的相关性分析

Fig. 11 Analysis of correlation between the measurement data of pepino fruits from 1.00 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ UV-C and control treatments during storage

物) 的相对电阻率均呈极显著正相关 ($P<0.01$), W3C(氨类和芳香成分) 和 W2S(醇类) 的相对电阻率均呈现极显著负相关等 ($P<0.01$)。这说明随着贮藏时间的延长, 人参果中的醇类物质转化为具有芳香气味的酯类物质。已有文献证实, 在人参果成熟过程中醇类物质会不断地转化为酯类物质增加果实令人愉悦的香气^[6]。在贮藏过程中, 对照组中冷害指数和乙烯释放量、W5S(氮氧化合物)、W1S(甲基类化合物)、W2S(醇类)、W3S(长链烷烃) 的相对电阻率之间呈正相关, 与其他指标之间呈负相关, 而且与呼吸强度、W5C(短链烷烃和芳香成分) 的相对电阻率均呈显著负相关 ($P<0.05$), 但 UV-C 处理后冷害指数与 W1C(芳香族有机化合物)、W3C(氨类和芳香成分) 和 W3S(长链烷烃) 的相对电阻率呈正相关, 和其他指标之间呈负相关, 且与 W1W(无机硫化成分)、W2W(有机硫化物和芳香成分) 的相对电阻率呈显著负相关 ($P<0.05$)。对照组中呼吸强度和 W5C(短链烷烃和芳香成分) 的相对电阻率呈显著正相关 ($P<0.05$), 处理之后并无显著相关性。乙烯释放量处理前和电子鼻 10 个传感器的相对电阻率之间并不存在显著相关性, UV-C 处理之后, 乙烯和 W6S(氢化物) 的相对电阻率呈极显著正相关 ($P<0.01$), 和 W1C(芳香族有机化合物) 的相对电阻率呈显著正相关 ($P<0.05$)。由此可以推测, UV-C 处理不仅推迟人参果冷害发生的时间, 降低其呼吸强度和乙烯释放量, 还可以抑制人参果硫化物等挥发性物质的形成。

3 讨论与结论

温度是影响果实采后贮藏品质的主要环境因子, 低温贮藏被认为是果蔬保鲜最有效的方法之一^[33]。然而许多果蔬对低温敏感, 在贮藏温度低于 10 ℃ 时便会发生冷害, 从而失去商品价值, 如桃、香蕉、葡萄柚等^[34]。同时研究表明低温对果实香气也会产生影响, 12 ℃ 低温贮藏会造成番茄果实香气挥发性物质释放减少^[35-36]; 葡萄低温贮藏可以增加葡萄汁中的酸类、醇类和酯类等香气物质, 但会增加葡萄皮中的酚类物质含量^[37-38]。在本研究中发现, 人参果属于冷敏型果实, 贮藏在 5 ℃ 以下易发生冷害现象, 导致果实的风味和质地等感官品质下降最迅速, 且在冷胁迫下有较高的呼吸强度和乙烯释放量; 通过电子鼻数据分析可知, 在低温贮藏期间能增加人参果香气成分中的硫化物、氮氧化合物和醛类等物质含量。综上所述, 低温贮藏会明显影响人参果贮藏期间的风味变化, 香气成分的变化也

可能是果实在低温逆境中的一种保护机制, 但是详细的香气成分的物质及含量需要进一步通过 GC-MS 等仪器进行检测判定。

UV-C 作为一种新型安全有效的果蔬贮藏前处理方法, 可以延缓果蔬的成熟和衰老, 而且 UV-C 对果实的冷害的发生也有明显的抑制作用^[34]。任伟等^[39]研究发现 3 kJ·m⁻² UV-C 处理能有效延迟贡橘果实的冷害发生时间, 并能减轻冷害症状。在本研究中亦发现, 用不同剂量的 UV-C 辐照处理人参果, 与对照组相比, 可以减轻人参果的冷害症状, 且 1.00 kJ·m⁻² 处理组能有效地将冷害发生时间推迟 6 d, 保持冷胁迫下果实的风味和质地等感官品质, 降低其呼吸强度和乙烯释放量, 而且延缓了硫化物和甲烷类等挥发性风味物质的产生, 从而较好地维持果实风味品质。因此, UV-C 辐照处理在人参果贮藏期间起到较好的抑制冷害和保持风味品质的效果。

综上所述, 本试验提供了一种 UV-C 辐照处理在人参果采后贮藏保鲜中的方法。首先通过不同温度贮藏, 确定人参果在 5 ℃ 及以下贮藏会发生严重的冷害, 使果实的风味和质地等感官品质急剧下降, 且会增加人参果香气成分中的硫化物、氮氧化合物和醛类等物质的含量。然后将人参果用不同剂量的 UV-C 辐照处理, 于 5 ℃ 条件下贮藏, 研究 UV-C 处理对人参果冷害的影响。结果表明, UV-C 处理可以明显降低人参果在低温下的呼吸强度和乙烯释放量, 减轻人参果的冷害症状, 抑制香气成分中硫化物和甲烷类等挥发性物质的释放, 从而保持人参果的风味和质地等感官品质。其中, 1.00 kJ·m⁻² 剂量 UV-C 辐照处理人参果的效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨世鹏, 蒋晓婷, 许盼盼, 等. 人参果营养成分、采后生理及贮藏保鲜方式研究进展[J]. 西北农业学报, 2020, 29(10): 1447-1456.
- [2] KOLA O, SIMSEK M, DURAN H, et al. HPLC determination of carotenoid, organic acid, and sugar content in pepino (*Solanum muricatum*) fruit during the ripening period[J]. *Chemistry of Natural Compounds*, 2015, 51(1): 132-136.
- [3] REDGWELL R J, TURNER N A. Pepino (*Solanum muricatum*): Chemical composition of ripe fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1986, 37(12): 1217-1222.
- [4] SHIOTA H, YOUNG H, PATERSON V, et al. Volatile aroma constituents of pepino fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 43(4): 343-354.
- [5] CONTRERAS C, SCHWAB W, MAYERSHOFER M, et al. Study of physiological and quality parameters during

- development and ripening of pepino (*Solanum muricatum* Aiton) fruit[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2019, 79(3): 385-395.
- [6] SANCHEZ M, CAMARA M, PROHENS J, et al. Variation in carbohydrate content during ripening in two clones of pepino[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(13): 1985-1991.
- [7] 陵军成. 化肥减量和增施生物有机肥对人参果产量、品质和耐贮性的影响[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(4): 77-82.
- [8] 朱娜, 潘磊庆, 郭慧颖, 等. 基于电子鼻检测“霞晖 5 号”桃果实的冷害[J]. *食品科学*, 2014, 35(4): 95-100.
- [9] LIZANA L, LEVANO B. Caracterizaci3n y comportamiento de post-cosecha del pepino dulce, *Solanum muricatum*, Ait[J]. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 1977, 21: 11-15.
- [10] 姚听, 涂勇. 壳聚糖涂膜对人参果贮藏保鲜效果的研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2012(12): 56-58.
- [11] EL-ZEFTAWI B M, BROHIER L, DOOLEY L, et al. Some maturity indices for tamarillo and pepino fruits[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1988, 63(1): 163-169.
- [12] SUSANNE H, HERU W, LÜDDERS P, et al. Postharvest quality of pepino (*Solanum muricatum* Ait.) fruit in controlled atmosphere storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 628-634.
- [13] 马丽丽, 左进华, 王清, 等. UV-C 处理对青椒色泽和生理品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 281-288.
- [14] 李玉娟. 采后短波紫外线处理对苹果抗病性及品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [15] 徐艳群. 短波紫外光 (UV-C) 采前辐照调控草莓果实品质和植株抗病性机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [16] SAMPEDRO F, PHILLIPS J, FAN X T. Use of response surface methodology to study the combined effects of UV-C and thermal processing on vegetable oxidative enzymes[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 189-196.
- [17] 尹建云. UV-C 结合热处理调控黄瓜冷害机理研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- [18] 王涛, 郝利平, 李月圆, 等. 壳聚糖及 UV-C 处理对长山药冷害和品质的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 732-738.
- [19] 陈奕兆, 刚成诚, 王亦佳, 等. UV-C 处理对水蜜桃果实冷害及贮藏品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2013, 42(1): 16-21.
- [20] WILSON A D, BAIETTO M. Applications and advances in electronic-nose technologies[J]. *Sensors*, 2009, 9(7): 5099-5148.
- [21] NAHID A, MOHAMMAD J D, ADIEH A. Detection of ripeness grades of berries using an electronic nose[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(9): 4919-4928.
- [22] YANG Y Q, HUA J, DENG Y L, et al. Aroma dynamic characteristics during the process of variable-temperature final firing of Congou black tea by electronic nose and comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109656.
- [23] JIA W, LIANG G, JIANG Z, et al. Advances in electronic nose development for application to agricultural products[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(10): 2226-2240.
- [24] 葛东颖, 李华佳, 杨成聪, 等. 不同处理工艺对猕猴桃果酒品质的影响[J]. *中国酿造*, 2019, 38(4): 70-74.
- [25] BEGHI R, BURATTI S, GIOVENZANA V, et al. Electronic nose and visible-near infrared spectroscopy in fruit and vegetable monitoring[J]. *Reviews in Analytical Chemistry*, 2017, 36(4). doi: 10.1515/revac-2016-0016.
- [26] DOMINGO M, SERRRANO M, VALERO D. Physiological changes in pepino (*Solanum muricatum* Ait.) fruit stored at chilling and non-chilling temperatures[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(2): 177-186.
- [27] PLUDA D, RABINOWITCH H D, KAFKAI U. Pepino dulce (*Solanum muricatum* Ait.) quality characteristics respond to nitrogen nutrition and salinity[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1993, 118(1): 86-91.
- [28] 刘泽松, 史君彦, 左进华, 等. UV-C 和 LED 红光复合处理对西兰花贮运品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 41(17): 1-14.
- [29] 范林林, 王清, 左进华, 等. 外源 NO 处理对茄子贮藏品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(1): 186-192.
- [30] 刘瑶, 徐冬颖, 刘婧, 等. 基于电子鼻的运输振动蔬菜气态品质检测[J]. *北方园艺*, 2019(18): 100-109.
- [31] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速判别[J]. *食品与机械*, 2015, 31(6): 137-141.
- [32] 千春录, 朱芹, 高姗, 等. 外源褪黑素处理对采后水蜜桃冷藏品质及冷害发生的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(3): 702-708.
- [33] 郭雨萱, 郝利平, 卢银洁. 不同处理对茄子采后冷害及相关酶活性的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(9): 668-672.
- [34] 金鹏, 王静, 朱虹, 等. 果蔬采后冷害控制技术及机制研究进展[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(5): 167-174.
- [35] 邵青旭, 高湘荃, 时晓雪, 等. 低温贮藏对薄皮甜瓜果实风味品质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(1): 62-69.
- [36] MAUL F, SARGENT S A, SIMS C A, et al. Tomato flavor and aroma quality as affected by storage temperature[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(7): 1228-1237.
- [37] ZHANG B, TIEMAN D M, JIAO C, et al. Chilling-induced tomato flavor loss is associated with altered volatile synthesis and transient changes in DNA methylation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(44): 12580-12585.
- [38] 唐国冬, 廖欣怡, 郑雅轩, 等. 低温对赤霞珠葡萄香气和单体酚含量的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(20): 48-54.
- [39] 任伟, 郝利平. UV-C 处理对贡橘冷害的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(6): 1111-1116.