裴冉冉, 张楠, 王永霞, 等. 基于电子鼻和电子舌评价 1-甲基环丙烯对红香酥梨感官和风味品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 430−441. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090154

PEI Ranran, ZHANG Nan, WANG Yongxia, et al. Evaluation of the Effects of 1-Methylcyclopropene on the Sensory and Flavor Quality of 'Hongxiangsu' Pear Using Electronic Nose and Electronic Tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 430−441. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090154

· 贮运保鲜与冷链技术 ·

基于电子鼻和电子舌评价 1-甲基环丙烯对红香酥梨感官和风味品质的影响

裴冉冉[1,2], 张　楠[2], 王永霞[1,*], 关军锋[2,*]

（1.河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056038;
2.河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北 石家庄 050051）

摘　要: 为探究智能感官技术对红香酥梨贮藏期间品质及风味物质变化的监测效果，本研究以红香酥梨为材料，设置冷藏 0、60、120 d 及冷藏 120 d 后常温货架 3、6 d 共 5 个时间点，采用电子鼻与电子舌技术结合传统理化分析和气相色谱-质谱联用（GC-MS）方法，系统评估 1-甲基环丙烯（1-MCP）处理后红香酥梨贮藏过程中果实品质和风味的动态变化规律。结果表明，1-MCP 处理延缓了吸光度差值（I_{AD}）、蔗糖、总有机酸、苹果酸含量和除香味外其他感官特征的变化，显著抑制了果皮 a^*值、果肉葡萄糖、果糖含量和感官香味的升高，对硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸、L^*值、b^*值、果糖、山梨醇和葡萄糖含量没有显著影响。通过 GC-MS 技术共鉴定出 51 种挥发性物质，1-MCP 处理导致酯类物质含量下降，而醛类物质相对丰度上升，延缓了果实后熟进程中香气变化。电子鼻传感器阵列能够有效区分贮藏过程中红香酥梨的香气特征，其中电子鼻传感器 W5S 与感官香味密切相关。电子舌的酸味与感官质地、酸度、涩度以及果肉硬度、总有机酸和醛类呈正相关，与果肉甜度、L^*值、a^*值、b^*值、酯类和烷烃类呈负相关。总之，本研究证实电子鼻、电子舌感官技术可一定程度上反映传统人工感官评价，关联梨果实风味物质在贮藏过程中的代谢变化，为果实采后质量智能监测提供可靠的理论依据。

关键词: 红香酥梨, 电子鼻, 电子舌, 感官品质, 风味物质, 贮藏

中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0430−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090154

本文网刊:

Evaluation of the Effects of 1-Methylcyclopropene on the Sensory and Flavor Quality of 'Hongxiangsu' Pear Using Electronic Nose and Electronic Tongue

PEI Ranran[1,2], ZHANG Nan[2], WANG Yongxia[1,*], GUAN Junfeng[2,*]

（1.College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2.Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China）

Abstract: To evaluate the effectiveness of intelligent sensory technologies in monitoring the dynamic changes in fruit quality and flavor compounds of *Pyrus ussuriensis* 'Hongxiangsu' during storage, five sampling time points were set, including cold storage for 0, 60 and 120 days, as well as 3 and 6 days of ambient shelf life following 120 days of cold storage. The flavor difference and other quality indicators of *Pyrus ussuriensis* 'Hongxiangsu' under 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment during storage were assessed using electronic nose (E-nose) and electronic tongue (E-tongue) analysis

收稿日期: 2025−09−15

基金项目: 国家财政部、农业农村部现代农业产业（梨）技术体系资助项目（CARS-28-23）。

作者简介: 裴冉冉（2001−）, 女, 硕士, 研究方向: 食品加工, E-mail: a13343207719@126.com。

*** 通信作者:** 王永霞（1972−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 功能性食品研究与开发, E-mail: wyxhd2004@126.com。

关军锋（1966−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果实品质生理与贮藏保鲜, E-mail: junfeng-guan@263.net。

combined with physicochemical measurements and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that 1-MCP treatment delayed the decline in the absorbance difference value (I_{AD}), sucrose content, total organic acids content, malic acid content, and most sensory attributes (except aroma), while suppressing increased in peel a^* value, as well as glucose and fructose contents in fruit flesh and sensory aroma intensity. No significant effects of 1-MCP were observed on fruit firmness, soluble solids content (SSC), titratable acidity (TA), peel L^* value, peel b^* value, fructose content, sorbitol content and glucose content. A total of 51 volatile compounds were detected, among which 1-MCP treatment decreased the relative abundance of ester but increased that of aldehydes, delaying the aroma changes during fruit ripening. Notably, the E-nose sensor array effectively distinguished the aroma characteristics of 'Hongxiangsu' pear during storage, with the W5S sensor closely correlated with sensory aroma. The sourness signal of the E-tongue showed positive correlations with texture, acidity, astringency, as well as pulp firmness, total organic acids, and aldehydes level, but negative correlations with pulp sweetness, L^* value, a^* value, b^* value, esters content, and alkanes level. Overall, this study demonstrates that E-nose and E-tongue technologies can partially reflect traditional sensory evaluation and link pear flavor components, thereby providing a reliable theoretical basis for intelligent postharvest quality monitoring of fruit.

Key words: 'Hongxiangsu' pear; electronic nose; electronic tongue; sensory quality; flavor substances; storage

梨是一种重要经济作物，在全球 50 多个国家广泛种植。中国是梨的核心产区，其产量与种植面积均居世界首位[1]。红香酥梨作为中国特色的优良品种，以其独特的鲜甜口感、脆嫩多汁的特性而备受消费者青睐。然而，梨是一种典型的呼吸跃变型果实，采后极易因成熟衰老进程导致品质急剧劣变[2]。研究表明红香酥梨在贮藏期间易出现果皮黄化、油腻化及果心褐变等品质劣变现象[3]，严重影响梨果实的商品价值。当前商业保鲜主要依赖冷藏与 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理[4−5]。冷藏通过有效抑制果实的呼吸作用和乙烯的释放速率，减缓果实的微生物活动，从而保持食品的新鲜度和质量。1-MCP 通过竞争性结合乙烯受体，阻碍乙烯信号传导，进而抑制乙烯合成，达到延缓果实衰老和延长贮藏期的目的[6]。王志华等[7] 发现添加 1-MCP 处理能保持冷藏和货架期红香酥梨果实外观和风味，并降低其呼吸强度，有利于长期贮藏。

果实风味的形成与维持依赖于挥发性有机物(VOCs)与非挥发性物质的组成和含量。目前在果蔬中鉴定到超过 2000 种 VOCs，主要包括酯类、醛类、醇类等[8]。例如，陈美玉等[9] 在黄冠梨贮藏期间检测到果皮和果肉中分别含有 51 和 48 种 VOCs。在库尔勒梨中，醛类物质为果实提供了青草香味，而酯类化合物提供了果香味[10]。李美萍等[11] 发现红香酥梨的特征香气成分为乙酸乙酯、己醛、乙酸己酯、己酸乙酯等物质。随着贮藏时间延长，这些风味物质的组成与比例会发生显著变化，最终影响果实的感官品质。近年来的基因组学研究揭示，红香酥梨果实品质性状如糖分和有机酸的积累受到等位基因特异性表达的调控，这为理解采后风味变化提供了分子基础[12]。

传统的水果品质评价具有客观性不强、耗时费力及成本高等问题[13]。近年来，智能感官技术(如电子鼻、电子舌)的发展为果实品质的无损、快速、客观评价提供了新的解决方案[14]。电子鼻通过气敏传感器阵列模拟人类嗅觉系统，可对果实整体香气进行模式识别与量化分析[15]；电子舌则通过味觉传感器阵列模拟人类味觉，实现对酸、甜、苦、涩、鲜等基本味觉指标的精准检测[16]。此外，智能感官技术结合化学计量学方法(如主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)、偏最小二乘回归(PLSR))，可建立果实硬度、可溶性固形物含量(SSC)、可滴定酸(TA)等理化指标的预测模型，为实现品质无损检测与货架期预测提供了可能[17]。本研究整合人工感官评价与智能感官技术，既能够弥补人工评价的主观性与不一致性，又可增强智能感官结果的说服力[18]，从而更全面地表征红香酥梨的综合风味品质。

目前对红香酥梨采后贮藏的研究发现 1-MCP 处理能延长其保质期[19]，但是其风味物质与感官品质的变化规律尚未被系统解析，缺乏智能感官技术与多维度品质指标的整合分析。因此，本研究以红香酥梨为材料，通过电子鼻与电子舌技术，结合人工感官评价与气相色谱-质谱联用(GC-MS)验证，系统解析其在多时间点(冷藏 0、60、120 d 及货架期 120+3 d、120+6 d)贮藏过程中的感官品质与风味物质动态变化规律。本研究旨在建立基于电子鼻/舌的红香酥梨品质评价方法，揭示关键风味物质(如酯类、醛类)与感官属性(酸度、甜度、果香)的关联性，为红香酥梨的快速品质检测与鉴定提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

红香酥梨　于商业成熟期(2024 年 9 月 15 日)采自河北省邢台市宁晋县，挑选横径 80±5 mm、成熟度一致且无机械损伤和病虫害的果实；1-MCP　商品名为聪明鲜(Smart Fresh)，美国阿格洛法士公司生产，登记证号 PD20131624，每小包药包含 1-MCP 有效成分 0.014%，质量 0.625 g；乙腈(色谱纯)　默克股份有限公司；3-壬酮(色谱纯)　梯希爱(上海)化成工业发展有限公司；氯化钠、氢氧化钠(分析纯)、磷酸二氢铵、无水乙醇(均为色谱纯)　天津市永大化

学试剂有限公司; 葡萄糖、山梨醇、蔗糖　色谱纯, 上海易恩化学试剂有限公司; 果糖　色谱纯, 上海阿达玛斯试剂有限公司; 草酸、酒石酸、奎宁酸、苹果酸、莽草酸、乳酸、柠檬酸、琥珀酸、富马酸　色谱纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司; 交联聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)　上海生工生物有限公司。

RS2200QUV 超纯水系统　上海乐枫生物科技有限公司; CR-400 色度仪　柯尼卡美能达传感器有限公司; GY-4 型硬度计　浙江托普仪器有限公司; PAL-I 型手持数字糖度仪　日本 ATOGO 公司; DA-meter 设备　北京阳光亿事达公司; SA-4028 型电子舌　日本 Insent 公司; JYL-CO12 榨汁机　九阳股份有限公司; PEN3 型电子鼻　德国 Airsense 公司; Waters E2695 高效液相色谱仪　美国 Waters 公司; GCMS-TQ8040气相色谱质谱联用仪　日本岛津公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验分组　对照组(CK)和 1-MCP 组均取 40 kg 梨果(分装于 5 箱, 每箱 8 kg), 采用瓦楞纸箱内衬 PE 膜包装。CK 组经扎口后置于 0±1 ℃ 环境中贮藏; 1-MCP 组则于扎口前在袋内加入一袋聪明鲜, 扎口后密闭熏蒸处理 24 h(温度 24±1 ℃, 相对湿度 85%±2%), 后置于 0±1 ℃ 环境中贮藏。预实验发现红香酥梨在冷库贮藏 120 d 时品质会发生明显变化, 因此在贮藏第 60、120 d 测定果实品质, 并取果肉液氮速冻, 后−80 ℃ 冻存。贮藏 120 d 后取果实置于室温 24±1 ℃ 中贮藏, 在第 3 d 和第 6 d 时测定果实品质指标, 取果肉液氮速冻, 后−80 ℃ 冻存。取样时处理设 3 次重复, 每个重复 10 个果实。

1.2.2　硬度、可溶性固形物含量(SSC)、可滴定酸(TA)及吸光度差值(I_{AD})的测定　采用 GY-4 型硬度计测定梨果实硬度, 沿果实赤道部位相对两点测定果实去皮硬度(N); 采用 PAL-I 型手持数字糖度仪, 吸取梨果实果汁, 测定 SSC; 采用酸碱滴定法[20] 测定 TA 含量, 将 10 mL 梨汁用蒸馏水定容至 100 mL, 经两层纱布过滤后, 取 20 mL 滤液, 加入 2 滴 1% 酚酞指示剂, 用经邻苯二甲酸氢钾标定的 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定至溶液呈淡粉色且 0.5 min 内不褪色为止, 记录 NaOH 消耗体积, TA 计算如下式。

$$TA(\%) = \frac{V \times c \times (V_1 - V_0) \times f}{m \times V_s} \times 100$$

式中: V: 样品提取液总体积, mL; c: NaOH 滴定液浓度, mol/L; V_1: 滴定过滤液时 NaOH 溶液消耗体积, mL; V_0: 滴定蒸馏水所用的 NaOH 溶液的体积, mL; f: 折算系数, g/mol, 苹果酸 0.067; m: 样品质量, g; V_S: 滴定时所过滤的溶液体积, mL。

采用 DA-Meter 仪器测定吸光度差值(I_{AD}), 参照冯云霄等[3] 方法在每个供试梨果的阴阳面赤道处标记十字线, 将仪器探头紧贴十字线处果面进行测定。每次测定前均需将探头对准并紧贴标准板白色部分校准。

1.2.3　色度的测定　使用 CR-400 色度仪测定果皮颜色的变化, 选取果实中心赤道面上两个相互对称的点为测定点, 其中 L^*值表示明亮程度, 其值越大, 表示亮度越大; a^*值表示红绿程度, 正值表示偏红, 负值表示偏绿; b^*值表示黄蓝程度, 正值表示偏黄, 负值表示偏蓝。

1.2.4　可溶性糖含量的测定　参照 Ma 等[21] 的方法测定糖类化合物含量。准确称取经液氮冷冻后研磨的果肉样品 0.2 g 于离心管中, 加入去离子水 1 mL, 沸水浴灭酶 10 min, 加入 PVPP 0.1 g, 涡旋混匀 30 s, 于 4 ℃ 冰箱中静置 4 h 后 12000×g 离心 10 min, 取 200 μL 上清液加入 800 μL 乙腈摇匀, 过 0.45 μm 滤膜, 采用 Waters E2695 高效液相色谱仪进行测定, 分析条件如下: 检测器: 折光示差检测器; 色谱柱: CAP-CELLPAKNH2-UG8(5 μm, 4.6 mm×250 mm); 流动相: 80% 乙腈水; 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 35 ℃; 进样量: 10 μL。可溶性糖标准曲线及相关系数见表 1, 根据标准曲线换算, 得到果糖、山梨醇、葡萄糖、蔗糖的含量。甜度值的计算式参照姚改芳等[22] 方法, 以蔗糖的甜度值为 1.00, 果糖为 1.75, 葡萄糖为 0.70, 山梨醇为 0.40, 甜度值=蔗糖含量×1.00+果糖含量×1.75+葡萄糖含量×0.70+山梨醇含量×0.40。

表 1　可溶性糖标准曲线及决定系数

Table 1　Soluble sugar standard curve and coefficient of determination

标准品	保留时间(min)	标准曲线	线性范围(mg/mL)	R^2
果糖	8.403	Y=(3E−07)X+0.4272	0.1~8	0.9978
山梨醇	9.473	Y=(3E−07)X+0.3087	0.1~8	0.9991
葡萄糖	11.067	Y=(4E−07)X+0.2506	0.1~8	0.9959
蔗糖	18.755	Y=(3E−07)X+0.3256	0.1~8	0.9981

1.2.5　有机酸含量的测定　参照许九红等[23] 的方法测定有机酸含量。准确称取经液氮冷冻后研磨的果肉样品 1.0 g 于离心管中, 加入去离子水 5 mL, 超声提取 30 min 后 10000×g 离心 10 min, 过 0.45 μm 滤

表 2　有机酸的标准曲线及相关系数

Table 2　Organic acids standard curves and coefficient of determination

标准品	保留时间(min)	标准曲线	线性范围(mg/mL)	R^2
草酸	6.4	Y=(2E+07)X−75462	0.0050~0.4000	0.9993
酒石酸	6.7	Y=(2E+06)X−10064	0.0100~0.8000	0.9997
奎宁酸	7	Y=563405X−204.23	0.0200~1.6000	1
苹果酸	8.2	Y=765839X−2301.9	0.0500~4.0000	0.9999
莽草酸	9.0	Y=(4E+07)X+139979	0.0005~0.4000	0.9996
乳酸	9.5	Y=332364X+459.5	0.0100~0.8000	1
柠檬酸	12	Y=771498X+19929	0.1000~8.0000	1
琥珀酸	13.1	Y=331837X−652.7	0.0100~0.8000	1
富马酸	14.1	Y=(1E+08)X−4849.8	0.0005~0.0400	1

膜，采用 Waters E2695 高效液相色谱仪进行测定，分析条件如下：色谱柱：ADMEHRC18（5 μm，250 mm×4.6 mm）；流动相：20 mmol/L 磷酸二氢铵溶液（pH2.50）；流速：0.4 mL/min；检测波长 210 nm，进样量 10 μL。有机酸的标准曲线及相关系数见表 2，根据标准曲线换算，得到有机酸含量。

1.2.6　挥发性物质测定

1.2.6.1　样品处理　参照 Liu 等[24]的方法测定挥发性物质。称取经液氮冷冻后研磨的果肉样品 4 g 于顶空瓶中，加入 6 mL 氯化钠饱和溶液，再加入 200 μL 的 3-壬酮溶液（1 μg/mL，内标物质），40 ℃ 孵育 30 min。

1.2.6.2　GC 条件　色谱柱：SH Rxi-5Sil-MS，膜厚 0.25 μm，内径 0.25 mm，长度 30.0 m。接口温度 250 ℃，进样口温度 250 ℃，解析 3 min；载气为 He，载气流量 3 mL/min；进样方式为 Q3SCAN 自动无分流进样。程序升温：初温 40 ℃，保持 1 min，以 2 ℃/min 速率升到 100 ℃，再以 4 ℃/min 升至 190 ℃，保持 2 min，最后以 10 ℃/min 速率升到230 ℃，保持 5 min。

1.2.6.3　MS 条件　电离方式为电子轰击电离，离子源温度为 200 ℃，电子轰击能为 70 eV；扫描质荷比范围为 45~500。定性分析：谱数据库采用 NIST 17 标准谱库进行化合物鉴定，匹配度>80% 的化合物予以保留；定量分析：通过内标法进行定量分析，参照下式计算。

$$C = \frac{A}{A_0} \times C_0$$

式中：C：待测组分的浓度，μg/kg；A：待测组分的峰面积；A_0：内标物的峰面积；C_0：内标物的添加浓度，μg/kg。

1.2.7　感官评价　感官评价小组由 15 名健康、无感官缺陷的人员组成，感官评价前对小组成员预先进行培训，主要对评价目的、流程、标准品以及描述词等进行说明[25]，同时要求小组成员参与感官评价前 2 h 内禁烟、酒和辛辣等刺激性食物。感官评价采用 10 点标度法[9]，梨果感官评价评分标准见表 3，以整数 1~10 表示感受到的特征强度，0 为未检出，且允许多次品尝及嗅闻。

表 3　梨果感官评价评分标准

Table 3　Sensory evaluation scoring criteria for pear fruit

指标	评分标准
外观	以果形端正，外观果色典型，果梗完整，无碰压伤，无病虫害，无果锈及药斑为最强标准，根据果形、果色、果梗和果面情况进行打分
果肉	以本品种成熟时应有的白色色泽、果肉颜色无褐变为最强标准，根据果肉色泽情况进行打分
酥脆度	以乐事薯片的酥脆度为最强标准，根据品尝情况进行打分
质地	指完全咬穿放置在臼齿之间的样品所需的力，以奶油的硬度为最弱标准，根据品尝情况进行打分
多汁度	指前三次咀嚼时释放的汁液量，以西瓜的汁液量为最多汁标准，根据品尝情况进行打分
甜度	以3%蔗糖溶液的甜度为最弱标准，根据品尝情况进行打分
酸度	以0.043%柠檬酸溶液的酸度为最弱标准，根据品尝情况进行打分
涩度	以0.03%明矾溶液的涩度为最弱标准，根据品尝情况进行打分
香味	以3%乙酸己酯/水（v/v）的香味为最浓郁的标准，根据梨的气味情况进行打分

1.2.8　电子舌数据采集　参照 Hong 等[26]的方法测定梨汁的滋味。取果实经鲜榨并过滤除渣后梨汁 30 mL 于样品杯中，按顺序摆放电极清洗液、校准液和参比液，用于 SA-4028 型电子舌滋味测定。所测得的味觉指标包括酸味、甜味、咸味、丰富度和鲜味。

1.2.9　电子鼻数据采集　参照何近刚等[27]的方法测定梨整果的香气特征。将红香酥梨果实分为 3 组，每组约重 1.5 kg，置于 6 L 干燥常压密封罐内。密封 2 h 后，将 PEN3 型电子鼻探头插入密封罐 3 cm 处测定挥发性物质，每个样品进行 3 次平行实验。电子鼻检测参数设置为样品间隔时间 1 s，清洗时间 200 s，归零时间 5 s，样品准备时间 5 s，测试时间 110 s，载气流速 400 mL/min，进样流量 400 mL/min，选定 95~97 s 的稳定响应值进行数据分析。重复测定同一样品 6 次，电子鼻的金属传感器构成及数据精密度结果见表 4，结果显示各传感器响应值 RSD 值均<2%，实验数据结果稳定，表明仪器精密度良好。

表 4　PEN3 型电子鼻传感器响应特征

Table 4　Response characteristics of PEN3 electronic nose sensor

编号	型号	传感器	响应特性	RSD(%)
1	W1C	Aromatic	对芳香族化合物敏感	0.7
2	W5S	Broadrange	对氮氧化合物敏感	0.5
3	W3C	Aromatic	对氨类和芳香族化合物敏感	0.4
4	W6S	Hydrogen	对氢气敏感	1.0
5	W5C	Arom-aliph	对烷烃和芳香族化合物敏感	0.9
6	W1S	Broad-methane	对甲烷敏感	1.5
7	W1W	Sulphur-organic	对萜烯类和硫化物敏感	0.4
8	W2S	Broad-alcohol	对醇类及部分芳香族化合物敏感	0.7
9	W2W	Sulph-chlor	对有机硫化物及芳香族化合物敏感	0.4
10	W3S	Methane-aliph	对烷烃敏感	0.8

1.3　数据处理

数据为 3 次测定的平均值，结果用平均值±标准偏差表示。采用 SPSS R27.0.1.0.64 位版本软件进行单因素方差分析，并通过邓肯氏多重检验表示组间显著性差异（P<0.05），采用 Graphpad Prism 10.1.2 和 Origin Pro 2021 9.8.0.200 进行软件绘图，采用 SIMCA 14.1 进行 PLSR 分析，采用 Winmuster 软件分析电子鼻数据。

2　结果与分析

2.1　贮藏期间红香酥梨硬度、SSC、TA、I_{AD} 的变化

随着贮藏时间的增加，CK 和 1-MCP 组红香酥梨的硬度呈现下降趋势，且冷藏期（60 d、120 d）梨果

实硬度下降较快。1-MCP 组果实硬度与 CK 组差异不显著(图 1(A))。SSC 是水果成熟度和内部品质的重要指标。随着贮藏时间的推移, CK 和 1-MCP 组 SSC 表现出先降低后增加的趋势。贮藏 120+3 d 时 1-MCP 组 SSC 比 CK 组低 5.53%, 差异显著(P<0.05)(图 1(B))。1-MCP 组和 CK 组红香酥梨的 TA 含量呈现下降趋势, 贮藏 60 d 时, 1-MCP 组 TA 显著高于 CK 组(P<0.05)。随着贮藏时间的增加, 贮藏 120 d、120+3 d、120+6 d 时 1-MCP 组与 CK 组 TA 含量无显著差异(P>0.05)(图 1(C))。I_{AD} 值是评价果实成熟程度的重要无损检测指标, I_{AD} 值越低, 果实成熟程度越高。随着贮藏时间的增加, CK 组红香酥梨果实的 IAD 值在贮藏 60 d 时上升, 后不断下降。1-MCP 组红香酥梨果实的 IAD 值在贮藏 120+3 d 时上升, 贮藏 120+6 d 时下降。贮藏 120+6 d 时, 1-MCP 组 I_{AD} 值较 CK 组高 20.26%(P<0.05)(图 1(D))。由此可见, 贮藏期间红香酥梨硬度、TA、I_{AD} 呈现下降趋势, SSC 变化较小, 1-MCP 处理延缓了 I_{AD} 值的下降。

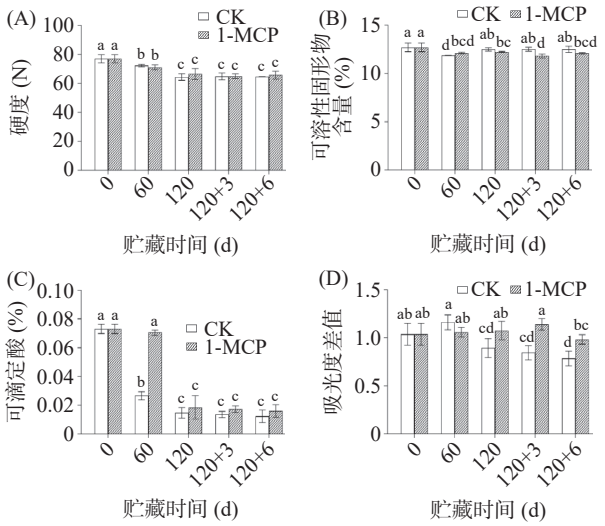


图 1 贮藏期间红香酥梨的硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸和 I_{AD} 指标的变化

Fig.1 Changes in firmness, soluble solids content, titratable acidity, and absorbance difference value of 'Hongxiangsu' pear during storage

注: 不同小写字母代表同一贮藏时间不同处理间、同一处理不同贮藏时间指标差异显著(P<0.05), 120+3、120+6 分别表示为冷藏 120 d 后常温货架3、6 d, 图 2 同。

2.2 贮藏期间红香酥梨果皮色度的变化

1-MCP 组和 CK 组红香酥梨果皮 a^*值随着贮藏时间的增加呈现上升趋势, 这与黄丽[28] 发现贮藏过程中红香酥梨果皮颜色逐渐由绿色变为黄色的研究结果一致。贮藏 120+3 d 后 1-MCP 组梨果实 a^*低于 CK 组, 表明 1-MCP 在贮藏期间能够保持果皮绿色(图 2(A))。但随着贮藏时间的增加, 1-MCP 组和 CK 组红香酥梨果皮 L^*和 b^*值无显著变化(图 2(B)和图 2(C))。

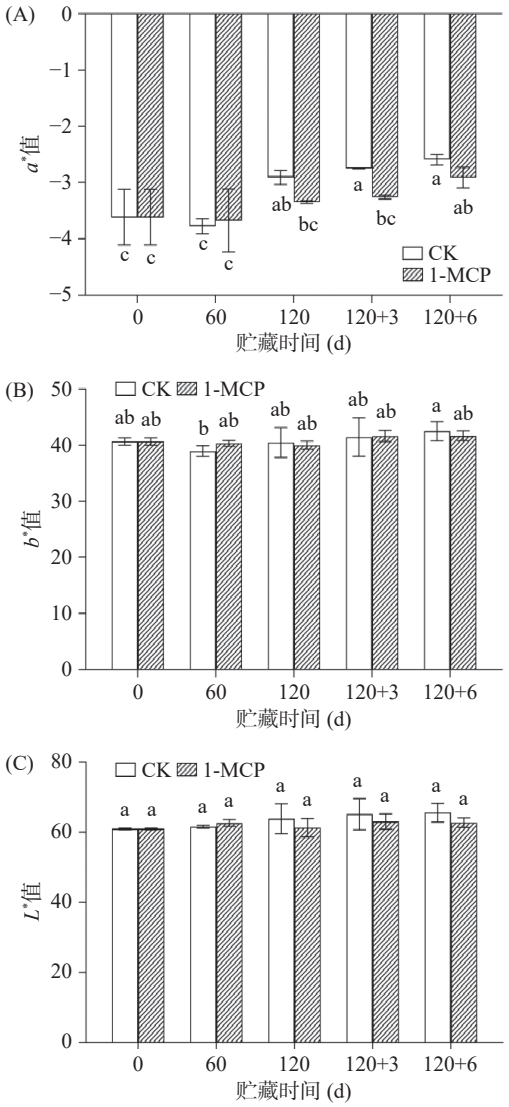


图 2 红香酥梨果皮的色度分析

Fig.2 Color analysis of the peel of 'Hongxiangsu' pear

2.3 贮藏期间红香酥梨糖类物质含量的变化

糖类物质是影响水果风味和口感的重要成分, 其代谢动态直接影响采后品质。贮藏期间红香酥梨中果糖、山梨醇、葡萄糖、蔗糖含量的影响如表 5 所示。红香酥梨 1-MCP 和 CK 组果糖含量在贮藏期间无明显变化。在冷藏期(贮藏 0、60、120 d)梨果 CK 组葡萄糖含量表现出上升的趋势, 1-MCP 组基本不变。在货架期 1-MCP 和 CK 组的葡萄糖含量表现出下降趋势。随着贮藏时间的增加, CK 组山梨醇含量呈现波动上升趋势, 1-MCP 组的山梨醇含量在贮藏 60 d 达到最高为 0.94±0.06 mg/g 后逐渐下降。蔗糖含量在贮藏 120+3 d 前呈现下降趋势, 在贮藏 120+6 d 时显著升高, 贮藏 120+6 d 时 1-MCP 组蔗糖含量比 CK 组高 54.5%(P<0.05)。这与 Lwin 等[29] 发现在贮藏后期 1-MCP 处理后'Wonhwang'梨保留了更高水平的蔗糖的研究结果一致。甜度值综合反映出各类可溶性糖对果实甜味的影响。随着贮藏时间的增加, CK 组果实甜度值呈先上升后下降趋势, 在贮藏 60 d 达到峰值, 贮藏 120+6 d 有所下降; 1-MCP

表 5　贮藏期间红香酥梨糖类物质含量及甜度值的变化

Table 5　Changes in soluble sugar content and sweetness value of 'Hongxiangsu' pear during storage

指标	CK					1-MCP				
	0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d	0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d
果糖(mg/g)	1.54±0.03^{c}	1.67±0.03^{ab}	1.61±0.08^{abc}	1.69±0.04^{a}	1.55±0.04^{bc}	1.54±0.03^{c}	1.58±0.12^{abc}	1.51±0.03^{c}	1.58±0.07^{abc}	1.54±0.03^{c}
葡萄糖(mg/g)	0.71±0.01^{c}	0.80±0.02^{b}	0.86±0.04^{a}	0.75±0.01^{c}	0.81±0.03^{b}	0.71±0.01^{c}	0.8±0.05^{b}	0.75±0.01^{c}	0.74±0.03^{c}	0.71±0.01^{c}
山梨醇(mg/g)	0.79±0.02^{d}	0.80±0.03^{d}	0.88±0.04^{bc}	0.82±0.02^{d}	0.89±0.02^{ab}	0.79±0.02^{d}	0.94±0.06^{a}	0.84±0.01^{bcd}	0.83±0.04^{cd}	0.79±0.02^{d}
蔗糖(mg/g)	0.17±0.01^{a}	0.09±0.01^{c}	0.08±0.00^{def}	0.04±0.00^{g}	0.11±0.01^{b}	0.17±0.01^{a}	0.09±0.03^{cd}	0.06±0.01^{ef}	0.06±0.01^{f}	0.17±0.01^{a}
甜度值	3.69±0.07^{bc}	3.89±0.08^{a}	3.86±0.19^{ab}	3.86±0.08^{ab}	3.77±0.10^{abc}	3.69±0.07^{bc}	3.84±0.30^{abc}	3.6±0.07^{c}	3.69±0.16^{bc}	3.69±0.07^{bc}

注：同行不同小写字母表示差异显著（P<0.05），表6、表7同。

组甜度值在贮藏 120 d 时降低，贮藏 120+6 d 上升至采收初始水平。

2.4　贮藏期间红香酥梨有机酸含量的变化

有机酸是影响水果风味和口感的重要成分，在一定程度上能反映果实内在营养物质的消耗程度。由表 6 可知，红香酥梨总有机酸含量在贮藏过程中呈显著下降趋势，CK 组与 1-MCP 组在贮藏 120+6 d 分别由 3.98 mg/g 下降至 2.74、3.1 mg/g，1-MCP 组红香酥梨的总酸含量显著高于 CK 组（P<0.05）。苹果酸作为主要酸性物质，其含量在贮藏后期同样显著下降，CK 组与 1-MCP 组在贮藏 120+6 d 时分别降至 1.13 mg/g 和 1.15 mg/g。此外，酒石酸、奎宁酸、乳酸及富马酸等有机酸也呈现出类似的衰减模式。何近刚等[27] 报道，梨果实中有机酸主要为苹果酸和柠檬酸。本研究中，红香酥梨果实中含量最高的有机酸为苹果酸，属于苹果酸优势型梨品种。贮藏期间红香酥梨果总酸和苹果酸含量呈下降趋势，1-MCP 处理通过抑制乙烯信号传导[30]，显著延缓了贮藏期间梨果实总酸含量的下降速率，有效缓解了苹果酸等关键酸代谢物的降解。

2.5　贮藏期间红香酥梨挥发性物质成分含量的变化

由图 3 和表 7 可知，红香酥梨中共检测出 51 种化合物，其中包括酯类 14 种、醛类 9 种、醇类 9 种、烯类 12 种、酮类 5 种和烷烃类 2 种（表 7）。贮藏过程中 1-MCP 组和 CK 组的 VOCs 种类及浓度存在明显差异，CK 组 VOCs 总浓度在贮藏 60 d 时略有降低，随后总浓度不断增加；而 1-MCP 组 VOCs 总浓度在贮藏 120 d 略有增加，随后无显著变化。从贮藏 120+3 d 后 CK 组 VOCs 总浓度始终高于 1-MCP 组，贮藏 120+6 d 时 CK 组 VOCs 含量比 1-MCP 组高 13.9%（表 7）。与已有研究对比，沈艾彬等[31] 在库尔勒香梨中鉴定出 44 种 VOCs，以酯类（23 种）和醛类（7 种）为主。本研究结果与其母本库尔勒香梨在成熟期的香气成分组成接近，均以酯、醛类物质为核心。而吴丹丹等[32] 发现玉露香梨为醛香型品种，其 VOCs 包括醛类 18 种、酯类 8 种及其他类物质 27 种，体现出不同梨品种在香气代谢类型上存在显著遗传差异。

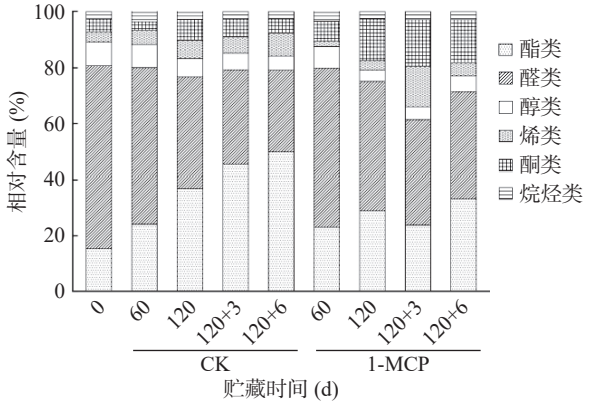


图 3　贮藏期间红香酥梨的挥发性物质组分相对含量的变化

Fig.3　Changes in relative content of volatile components of 'Hongxiangsu' pear during storage

表 6　贮藏期间红香酥梨有机酸化合物含量的变化

Table 6　Changes in organic acid content of 'Hongxiangsu' pear during storage

指标(mg/g)	CK					1-MCP				
	0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d	0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d
草酸	0.21±0.01^{bc}	0.2±0.00^{c}	0.23±0.00^{a}	0.21±0.00^{bc}	0.17±0.01^{d}	0.21±0.01^{bc}	0.21±0.00^{bc}	0.21±0.00^{bc}	0.22±0.00^{ab}	0.17±0.02^{d}
酒石酸	0.08±0.00^{b}	0.07±0.00^{cd}	0.06±0.00^{f}	0.06±0.00^{e}	0.07±0.00^{cd}	0.08±0.00^{b}	0.06±0.00^{de}	0.06±0.00^{d}	0.07±0.01^{bc}	0.09±0.00^{a}
奎宁酸	0.34±0.00^{a}	0.30±0.00^{bc}	0.35±0.01^{a}	0.3±0.00^{b}	0.27±0.03^{d}	0.34±0.00^{a}	0.36±0.01^{a}	0.37±0.00^{a}	0.28±0.00^{c}	0.20±0.00^{e}
苹果酸	1.89±0.03^{a}	1.77±0.01^{b}	1.4±0.06^{c}	1.23±0.02^{e}	1.13±0.06^{f}	1.89±0.03^{a}	1.91±0.01^{a}	1.8±0.01^{b}	1.36±0.02^{d}	1.15±0.01^{f}
莽草酸	0.13±0.00^{b}	0.13±0.00^{ab}	0.14±0.00^{ab}	0.11±0.00^{c}	0.09±0.01^{d}	0.13±0.00^{b}	0.15±0.00^{a}	0.14±0.00^{ab}	0.11±0.00^{c}	0.09±0.02^{d}
乳酸	0.17±0.01^{a}	0.09±0.00^{c}	0.04±0.00^{h}	0.06±0.01^{ef}	0.06±0.00^{g}	0.17±0.01^{a}	0.11±0.00^{b}	0.07±0.00^{e}	0.08±0.01^{d}	0.06±0.01^{fg}
柠檬酸	0.25±0.01^{a}	0.2±0.01^{bc}	0.16±0.00^{d}	0.17±0.00^{d}	0.17±0.02^{d}	0.25±0.01^{a}	0.18±0.01^{cd}	0.2±0.00^{b}	0.2±0.00^{bc}	0.18±0.02^{cd}
琥珀酸	0.01±0.00^{g}	0.02±0.00^{e}	0.04±0.00^{b}	0.03±0.00^{c}	0.02±0.00^{f}	0.01±0.00^{g}	0.05±0.00^{a}	0.03±0.00^{c}	0.02±0.00^{d}	0.02±0.00^{e}
富马酸	0.91±0.03^{b}	0.77±0.04^{d}	0.8±0.04^{cd}	0.87±0.01^{bc}	0.76±0.01^{e}	0.91±0.03^{b}	0.78±0.01^{d}	0.93±0.01^{b}	0.93±0.12^{b}	1.14±0.02^{a}
总有机酸	3.98±0.07^{a}	3.53±0.04^{b}	3.2±0.03^{cd}	3.04±0.01^{d}	2.74±0.09^{e}	3.98±0.07^{a}	3.82±0.02^{a}	3.82±0.00^{a}	3.40±0.10^{bc}	3.10±0.03^{bc}

表 7 贮藏期间红香酥梨挥发性物质成分的组成与含量变化(μg/kg)

Table 7 Changes in volatile compound composition and content of 'Hongxiangsu' pear during storage (μg/kg)

分类	序号	保留时间(min)	中文名称	CK					1-MCP					香气描述[31−34]
				0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d	0 d	60 d	120 d	120+3 d	120+6 d	
酯类	A1	3.618	丁酸甲酯	1.34±0.11^{g}	2.12±0.06^{f}	3.5±0.01^{c}	3.8±0.01^{b}	4.66±0.06^{a}	1.34±0.11^{g}	2.04±0.05^{f}	2.58±0.11^{e}	2.96±0.01^{d}	1.48±0.31^{g}	菠萝香气
	A2	4.397	2-甲基丁酸甲酯	2.58±0.58^{d}	3.91±0.12^{c}	4.57±0.1^{b}	4.02±0.08^{bc}	4.97±0.21^{a}	2.58±0.58^{d}	4.05±0.14^{bc}	4.27±0.23^{ab}	0.05±0.00^{e}	4.45±0.04^{ab}	苹果香气
	A3	5.248	环丁烷羧酸-3-甲基丁酯	–	–	–	–	–	–	–	0.02±0.01	–	–	果香
	A4	5.956	乙酸丁酯	0.18±0.02^{f}	0.37±0.02^{f}	2.12±0.02^{d}	4.85±0.05^{b}	5.93±0.45^{a}	0.18±0.02^{f}	0.32±0.01^{f}	1.15±0.02^{e}	2.01±0.03^{d}	2.96±0.02^{c}	梨香
	A5	6.706	反式-2-己烯基异丁酸酯	–	–	0.05±0	–	–	–	–	–	–	–	果香
	A6	7.185	2-羟基-2-甲基丙酸甲酯	–	0.02±0.00^{bc}	0.07±0.00^{a}	0.03±0.02^{b}	0.01±0.00^{cd}	–	0.02±0.01^{bc}	–	0.02±0.00^{bc}	0.01±0.00^{d}	苹果香气
	A7	8.5	甲酸庚酯	1.39±0.11^{d}	1.55±0.05^{bc}	1.74±0.12^{a}	1.5±0.01^{cd}	1.45±0.03^{cd}	1.39±0.11^{d}	1.63±0.01^{ab}	1.53±0.09^{bc}	1.51±0.03^{cd}	1.45±0.03^{cd}	果香
	A8	16.143	乙酸己酯	1.57±0.14^{b}	1.37±0.06^{b}	0.48±0.05^{c}	1.55±0.51^{b}	2.35±0.05^{a}	1.57±0.14^{b}	0.75±0.05^{c}	–	–	–	梨香
	A9	20.147	甲酸辛酯	–	–	0.17±0.05^{b}	0.24±0.16^{b}	2.01±0.31^{a}	–	–	–	–	0.23±0.03^{b}	花香
	A10	22.872	乙酸庚酯	–	–	–	–	0.06±0.00	–	–	–	–	–	果香
	A11	23.686	辛酸甲酯	0.17±0.00^{e}	0.28±0.06^{e}	0.92±0.18^{b}	0.22±0.05^{de}	0.53±0.15^{c}	0.17±0.00^{e}	0.38±0.02^{de}	2.33±0.08^{a}	0.38±0.25^{de}	0.49±0.04^{cd}	花香
	A12	27.128	亚硫酸己基壬酯	–	–	–	0.08±0.04^{a}	–	–	0.02±0.00^{b}	–	0.02±0.00^{b}	–	–
	A13	29.662	乙酸辛酯	–	–	–	–	0.45±0.05	–	–	–	–	–	茉莉花香
	A14	36.225	癸酸甲酯	–	–	0.15±0.00^{b}	–	–	–	–	0.22±0.04^{a}	–	–	苹果香气
醛类	B1	5.578	己醛	22.57±0.29^{a}	20.29±0.69^{ab}	18.81±0.36^{bc}	15.91±2.00^{de}	14.13±4.05^{e}	22.57±0.29^{a}	21.63±0.25^{a}	20.89±0.74^{ab}	17.41±0.81^{cd}	16.9±0.70^{cd}	青草香气
	B2	7.124	2-己烯醛	0.89±0.15^{a}	0.3±0.31^{b}	0.02±0.00^{b}	0.05±0.01^{b}	0.11±0.03^{b}	0.89±0.15^{a}	0.22±0.23^{b}	0.02±0.02^{b}	0.34±0.32^{b}	0.15±0.02^{b}	青草香气
	B3	12.595	(E)-2-庚烯醛	0.22±0.02^{a}	0.19±0.02^{ab}	–	0.08±0.03^{d}	0.12±0.03^{c}	0.22±0.02^{a}	–	–	0.17±0.01^{b}	0.19±0.01^{ab}	青草香气
	B4	15.464	辛醛	1.15±0.12^{a}	0.18±0.01^{bc}	0.09±0.00^{d}	0.14±0.03^{cd}	0.24±0.02^{b}	1.15±0.12^{a}	0.15±0.01^{cd}	0.15±0.01^{cd}	0.13±0.02^{cd}	0.16±0.02^{cd}	柑橘香气
	B5	22.254	壬醛	2.74±0.07^{a}	0.81±0.22^{cd}	0.65±0.14^{d}	0.58±0.05^{d}	1.28±0.18^{b}	2.74±0.07^{a}	1.23±0.16^{b}	1.04±0.22^{bc}	0.61±0.17^{d}	1.03±0.01^{bc}	蜡质花香
	B6	26.029	(E)-2-壬烯醛	–	0.21±0.07^{cd}	0.16±0.09^{d}	0.32±0.15^{c}	0.52±0.08^{b}	–	0.15±0.02^{d}	1.05±0.01^{a}	0.26±0.04^{cd}	0.5±0.07^{b}	果香
	B7	26.811	十三醛	–	–	–	–	0.11±0.00	–	–	–	–	–	蜡香
	B8	29.259	癸醛	0.58±0.03^{a}	0.37±0.03^{b}	0.24±0.07^{c}	0.24±0.03^{c}	0.46±0.07^{ab}	0.58±0.03^{a}	0.52±0.12^{a}	0.5±0.12^{a}	0.23±0.05^{c}	0.47±0.03^{ab}	柑橘花香
	B9	29.524	2,4-二甲基苯甲醛	0.49±0.36^{b}	0.26±0.01^{b}	–	–	–	0.49±0.36^{b}	1.01±0.08^{a}	1.07±0.10^{a}	0.99±0.04^{a}	–	杏仁甜香
醇类	C1	5.362	四氢-2H-吡喃-2-甲醇	–	–	–	–	–	–	–	0.13±0.03	–	–	花香
	C2	7.182	3-辛醇	–	–	0.29±0.00^{a}	–	–	–	0.03±0.00^{b}	–	–	–	果香
	C3	8.135	1-己醇	1.87±0.06^{a}	1.85±0.25^{a}	1.14±0.40^{ab}	1.39±0.48^{ab}	1.23±0.96^{ab}	1.87±0.06^{a}	1.75±0.36^{a}	0.8±0.09^{b}	1.08±0.14^{b}	1.39±0.02^{ab}	青草香气
	C4	8.25	4-乙基-2-辛醇	0.39±0.01^{ab}	0.35±0.23^{ab}	0.11±0.02^{b}	0.32±0.32^{ab}	0.76±0.51^{a}	0.39±0.01^{ab}	0.39±0.25^{ab}	0.17±0.03^{b}	0.3±0.26^{ab}	0.12±0.00^{b}	油脂霉味
	C5	8.716	2,4-二甲基-2-戊醇	0.5±0.05^{b}	0.6±0.03^{a}	0.59±0.02^{a}	0.55±0.02^{ab}	0.56±0.02^{ab}	0.5±0.05^{b}	0.57±0.03^{a}	0.61±0.04^{a}	0.58±0.05^{a}	0.58±0.03^{a}	薄荷香气
	C6	14.129	1-辛烯-3-醇	–	–	0.08±0^{b}	–	–	–	–	0.03±0.00^{b}	–	0.17±0.05^{a}	蘑菇香气
	C7	17.193	2-丙基-1-戊醇	0.66±0.13^{b}	0.3±0.06^{de}	0.93±0.18^{a}	0.67±0.12^{b}	0.21±0.08^{e}	0.66±0.13^{b}	0.45±0.06^{cd}	0.32±0.03^{de}	0.38±0.07^{de}	0.51±0.03^{bc}	青草香气
	C8	21.885	3-壬醇	0.16±0.01^{a}	0.13±0.01^{ab}	0.13±0.03^{ab}	0.12±0.01^{ab}	0.14±0.02^{ab}	0.16±0.01^{a}	0.11±0.01^{b}	0.13±0.02^{ab}	0.11±0.02^{b}	0.12±0.03^{ab}	蜡香
	C9	27.202	1-十二醇	–	0.05±0.00^{a}	–	–	–	–	–	0.04±0.00^{b}	–	–	青草香气
烯类	D1	5.694	(E)-3-辛烯	–	–	–	–	0.05±0.00	–	–	–	–	–	脂香
	D2	9.037	苯乙烯	–	–	–	–	2.67±0.42^{b}	–	–	–	5.48±0.46^{a}	–	甜香
	D3	10.668	异丙苯	0.14±0.05^{d}	0.22±0.01^{b}	0.18±0.01^{bc}	0.17±0.00^{c}	0.16±0.02^{c}	0.14±0.05^{d}	0.18±0^{bc}	0.23±0.03^{ab}	0.28±0.03^{a}	0.19±0.02^{bc}	–
	D4	11.182	α-蒎烯	0.19±0.02^{d}	0.34±0.02^{bc}	0.3±0.08^{cd}	0.28±0.06^{cd}	0.06±0.01^{e}	0.19±0.02^{d}	0.25±0.03^{cd}	0.51±0.08^{a}	0.46±0.07^{ab}	0.35±0.05^{bc}	木香
	D5	12.048	(1S)-2,2-二甲基-3-亚甲基二环[2.2.1]庚烷	0.15±0.01^{a}	0.1±0.01^{bc}	0.08±0.01^{bc}	0.1±0.02^{c}	0.1±0.01^{c}	0.15±0.01^{a}	0.09±0.01^{bc}	0.11±0.01^{b}	0.15±0.03^{a}	0.12±0.01^{b}	樟脑香
	D6	12.723	1-乙基-3-甲基苯	0.03±0.00^{b}	0.06±0.00^{a}	0.03±0.00^{b}	–	–	0.03±0.00^{b}	–	–	0.03±0.03^{b}	–	甜香
	D7	12.74	β-蒎烯	–	–	0.55±0.75^{a}	–	–	–	0.05±0.01^{d}	0.1±0.03^{c}	0.2±0.17^{b}	0.08±0.01^{c}	胡椒木香
	D8	15.652	3-蒈烯	–	–	0.06±0.01^{a}	–	–	–	–	0.04±0.00^{b}	0.04±0.00^{b}	–	柑橘香气
	D9	17.016	D-柠檬烯	0.24±0.05^{d}	0.25±0.00^{d}	0.8±0.01^{a}	0.74±0.15^{ab}	0.24±0.03^{d}	0.24±0.05^{d}	0.25±0.02^{d}	0.69±0.07^{bc}	0.68±0.02^{bc}	0.6±0.01^{c}	柑橘香气
	D10	18.325	甘菊环	–	–	–	0.07±0.02^{a}	–	–	–	0.08±0.00^{a}	–	–	木香
	D11	31.931	1,3-二叔丁基苯	0.87±0.11^{c}	1±0.05^{bc}	0.9±0.07^{bc}	1.17±0.07^{a}	1.05±0.12^{ab}	0.87±0.11^{c}	–	–	0.27±0.04^{d}	0.99±0.07^{b}	果香
	D12	43.334	α-法尼烯	–	0.05±0.01^{b}	0.26±0.04^{a}	0.09±0.04^{b}	0.26±0.00^{a}	–	–	0.04±0.01^{b}	0.29±0.10^{a}	0.08±0.01^{b}	苹果香气
酮类	E1	3.2	5-乙基-4-甲基-3-庚酮	1.11±0.13^{e}	–	2.52±0.08^{a}	2.21±0.07^{cd}	2.11±0.12^{d}	1.11±0.13^{e}	2.17±0.11^{d}	2.27±0.11^{cd}	2.35±0.03^{bc}	2.45±0.04^{ab}	奶酪香气
	E2	14.341	6-甲基-5-庚烯-2-酮	0.64±0.09^{f}	1.15±0.04^{bcd}	1.21±0.12^{abc}	0.94±0.11^{cde}	0.84±0.07^{ef}	0.64±0.09^{f}	0.89±0.08^{def}	1.46±0.05^{a}	1.14±0.03^{bcd}	1.36±0.38^{ab}	青草香气
	E3	21.383	2-壬酮	0.14±0.03^{c}	–	–	0.1±0^{c}	–	0.14±0.03^{c}	0.09±0.01^{c}	4.12±0.25^{b}	5.27±1.25^{a}	3.81±0.15^{b}	茉莉香气
	E4	28.291	2-癸酮	–	0.08±0.00^{a}	–	–	–	–	–	–	–	0.06±0.01^{b}	柑橘香气
	E5	34.673	2-十一酮	0.07±0.01^{a}	–	–	–	–	0.07±0.01^{a}	–	–	–	–	蜡质花香
烷烃类	F1	4.324	3-甲氧基戊烷	1.19±0.21^{c}	1.47±0.11^{ab}	1.4±0.03^{ab}	1.41±0.06^{ab}	1.56±0.05^{a}	1.19±0.21^{c}	1.51±0.13^{ab}	1.35±0.07^{bc}	1.5±0.10^{ab}	1.38±0.01^{ab}	青草香气
	F2	4.672	2-丁基四氢呋喃	0.02±0.00^{c}	–	–	–	–	0.02±0.00^{c}	–	0.08±0.01^{a}	0.06±0.01^{b}	0.09±0.00^{a}	青草香气
	总计			43.8±1.74^{d}	40.41±0.79^{e}	50.07±0.71^{c}	51.18±2.39^{bc}	57.82±3.78^{a}	43.8±1.74^{d}	43.85±0.74^{d}	53.71±1.14^{b}	53.52±1.63^{b}	50.77±0.68^{bc}	

注: “–”代表含量低于检出限。

酯类和醛类化合物是红香酥梨果实中主要的香气化合物(图 3)。酯类物质大多呈现出成熟水果的香气, CK 组红香酥梨的酯类物质相对含量随贮藏时间增加, 其中乙酸丁酯的含量明显升高(表 7)。1-MCP

组酯类物质相对含量整体呈上升趋势，但是增加较 CK 组缓慢(图 3)。醛类物质可以为水果的整体香气赋予新鲜的青草香气[33]。随着贮藏时间的延长，CK 组的红香酥梨醛类物质相对含量呈下降的趋势(图 3)，其中己醛、辛醛、壬醛等醛类物质的含量下降较明显，这类化合物因具有特征性青草香气，其衰减直接导致果实“新鲜感”减弱。而 1-MCP 组醛类物质总量在贮藏期无明显变化，说明 1-MCP 处理可以有效保持梨的新鲜风味。

醇类化合物能呈现出青草和花果等香气[34]，贮藏过程中 CK 和 1-MCP 组红香酥梨醇类物质相对含量整体逐渐降低(图 3)。贮藏过程中 CK 组红香酥梨烯类物质的相对含量上升(图 3)，1,3-二叔丁基苯和 α-法尼烯含量整体增加，分别具有果香和苹果香气的气味；贮藏 120+3 d 时 1-MCP 组烯类物质总量显著增加，主要以具有松木树脂香的 α-蒎烯为主。此外，红香酥梨中还有少量的酮类和烷烃类化合物(表 7)。1-MCP 组的红香酥梨酮类物质相对含量随时间增加，主要物质为 2-壬酮，其具有青草气味[34]。烷烃类化合物具有青草香气，贮藏过程中相对含量基本不变(图 3)。

贮藏过程中脂氧合酶(LOX)途径改变会影响果实香气的变化[35]，Li 等[36] 报道了 1-MCP 处理通过抑制 *PuLOXs* 的转录水平，导致梨果实总挥发物和酯类的含量较低。赵江丽等[37] 发现 1-MCP 可以抑制乙烯合成基因的表达，进而抑制乙烯生成，降低香水梨中 VOCs 的含量。本研究结果表明，贮藏期间酯类物质相对含量增加，醛类含量减少，赋予红香酥梨成熟水果的香气。1-MCP 处理通过调控红香酥梨中 LOX 途径及乙烯合成，显著影响酯、醛等关键香气组分的代谢动态，从而延缓果实后熟进程中香气特征的演变。

2.6　感官评价

红香酥梨感官评价结果标度法及喜好度结果如图 4(A)、图 4(B)所示，随着贮藏时间增加，红香酥梨 CK 组质地、酸度和涩度感官评分呈下降趋势；甜度、外观、色泽、酥脆度感官评分呈先上升后下降趋势，在贮藏 120 d 达最大值；多汁度呈先下降后上升趋势，在贮藏 120+6 d 达最大值；香味感官评分呈上升趋势(图 4(A))。随着贮藏时间增加，CK 组红香酥梨的喜好度评分呈现先上升后下降的趋势，在贮藏 120+3 d 达最大值；1-MCP 组的喜好度评分整体变化不明显，在贮藏 120+6 d 时 1-MCP 组的喜好度评分明显高于 CK 组。

在贮藏 120+3 d、120+6 d 两种梨果实 CK 组外观评分骤降，推测是果皮褐变导致外观劣变，结合前述结果中所测色差数据可知，1-MCP 组褐变少发，色泽鲜亮度保留更优，说明 1-MCP 对表皮褐变有抑制作用。贮藏 120+6 d 梨果实 1-MCP 组时多汁度较高，表明 1-MCP 通过延缓果实软化维系果实脆度与

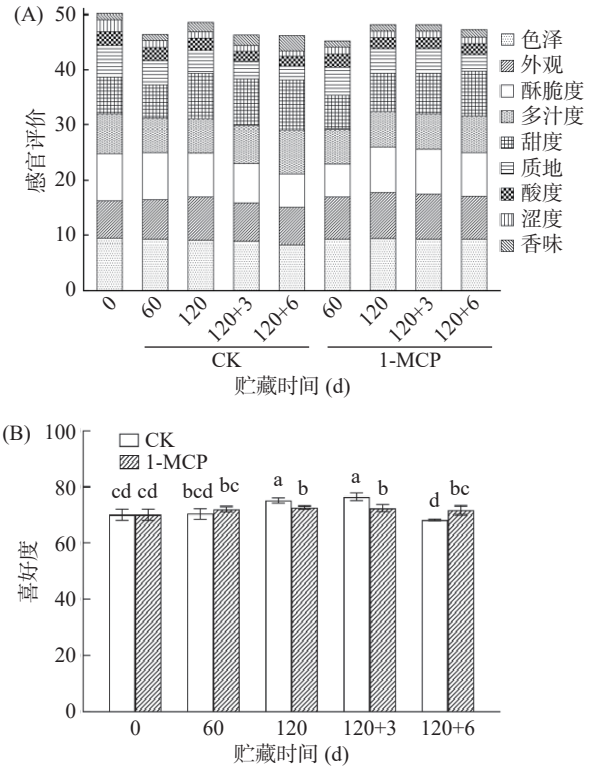


图 4　贮藏期间红香酥梨感官评价(A)和喜好度(B)

Fig.4　Sensory evaluation (A) and consumer preference (B) of 'Hongxiangsu' pear during storage

多汁性[38]，该结果与前述所测货架期 1-MCP 组果实的硬度略高于 CK 组的结果一致。与贮藏 0 d 相比，贮藏 120+6 d 两种梨果实 CK 组酸度显著降低 40%，这与 TA 降解直接相关；甜度呈先上升后下降，但理化数据中 SSC 无明显变化，这可能是因为梨果实在贮藏的过程中由于感官的拮抗作用[39]，酸度下降，从而减弱了评价员对甜度的感知。

2.7　电子舌分析

电子舌是一种模仿人类味觉感受的智能感官检测技术，可以快速、批量检测样品的味觉特征[40]。本研究通过识别不同传感器对样本的响应强度，检测到红香酥梨中甜味、酸味、鲜味、丰富度和咸味 5 种滋味，建立了红香酥梨样品的滋味热图，如图 5 所示。

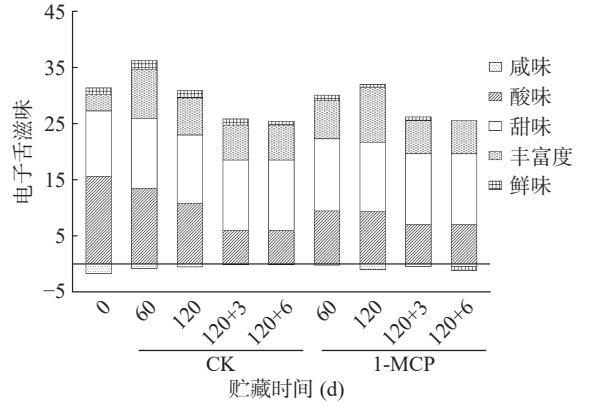


图 5　贮藏期间红香酥梨的电子舌滋味分析

Fig.5　E-tongue taste profile for 'Hongxiangsu' pear during storage

电子舌热图显示，随着贮藏时间的延长，红香酥梨 CK 组酸味响应值呈持续下降趋势，丰富度呈先上升后下降趋势，在贮藏 60 d 达最大值；咸味、甜味、鲜味略增加。这与前述 TA 含量下降、人工感官评价的结果相一致，表明贮藏进程中红香酥梨味觉层次逐渐单一化。1-MCP 组中红香酥的酸味下降幅度显著缓和，与贮藏 0 d 相比，贮藏 120+6 d 仍保留较高的响应值，甜味、鲜味及丰富度的衰减更平缓，咸味无明显波动。穆申玲等[41] 同样通过电子舌检测到红香酥梨汁中甜味、酸味、鲜味、丰富度和咸味滋味，但在梨汁中没有观察到咸味、丰富性及鲜味的明确模式。

2.8 电子鼻分析

电子鼻是一种模拟人类嗅觉系统的智能仿生感知技术，旨在通过气敏传感器阵列捕捉气味特征，并结合模式识别算法进行信号分析处理，实现对气味的区分和辨别[42]。PCA 作为考察多个变量间相关性的方法，其贡献率越大，表明主成分可以更好地反映原始数据信息。电子鼻结合 PCA 分析对贮藏期间梨果实挥发性物质的变化可进行有效区分。

由红香酥梨电子鼻的 PCA 得分分析图(图 6(A))可知，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 81.99% 和 13.53%，总贡献率为 95.52%。红香酥梨不同贮藏时期样品主要在 PC1 上分布，其中 CK 组红香酥梨随着贮藏时间的延长沿着 PC1 正向延伸且远离贮藏初期。1-MCP 组红香酥梨贮藏 60 d 特征值与 CK 组贮藏 60 d 无重叠，说明在处理早期，1-MCP 便抑制了红香酥梨挥发性气体的产生；1-MCP 处理后不同贮藏时期红香酥梨果实的分布基本接近贮藏初期，说明 1-MCP 处理果实贮藏挥发性成分未有明显变化。在人工感官评价中发现，1-MCP 组的红香酥梨香味变化不显著，但均明显高于贮后初期的香味，这表明电子鼻智能感官评价的结果也与前述的人工感官评价结果一致。

对红香酥梨挥发性气体不同传感器响应值经 Loading 分析显示，第一(PC1)、第二主成分(PC2)贡献率分别达 81.99% 和 13.53%，总贡献率为 95.52%(图 6(B))，分析结果基本包含了主要的样品信息，这是电子鼻进一步区分 CK 组和 1-MCP 组红香酥梨不同贮藏时间挥发性气体的基础。由电子鼻的 PCA 载荷分析图(图 6(B))可知，传感器 W1W(硫化物和萜烯类化合物)、W5S(氮氧化合物)、W2S(醇类和醛酮芳香化合物)、W2W(有机硫化物和芳香族化合物)、W1S(甲基类芳香物)在第一主成分上距离原点较远，说明这几个传感器是区分红香酥梨挥发性气体的敏感传感器。贮藏期间不同处理果实挥发性气体的传感器信号响应值变化情况如图 6(C)所示。CK 组果实挥发性气体的传感器信号响应值在贮藏期间呈现先升高后降低再升高的变化趋势，而 1-MCP 组果实的传感器信号响应值变化波动较小。

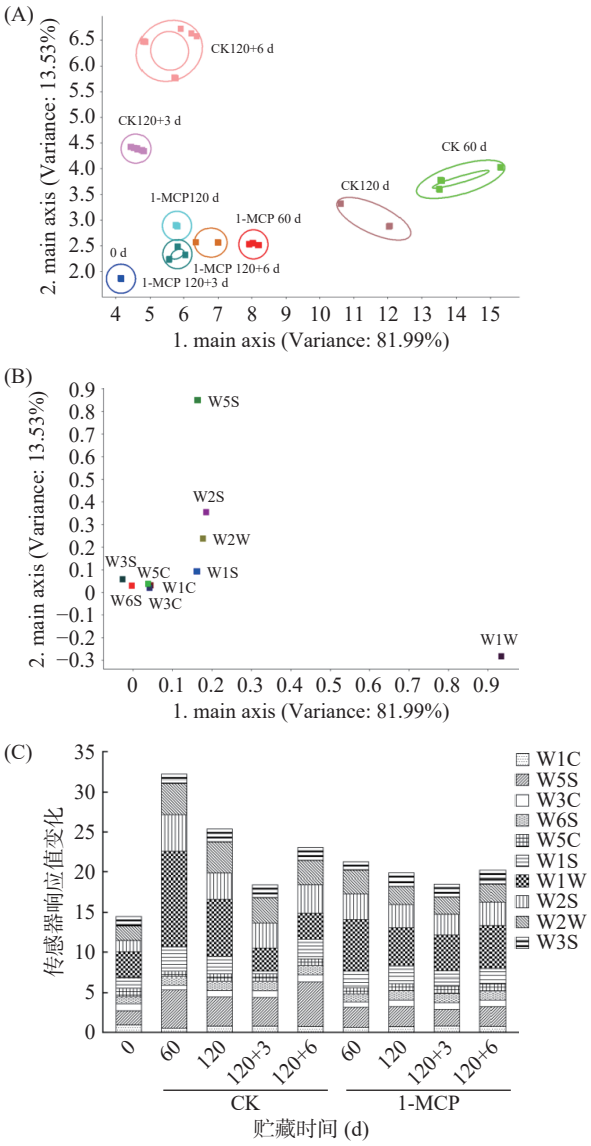


图 6 红香酥梨的电子鼻检测结果

Fig.6 Determination result of 'Hongxiangsu' pear by electronic nos

注：(A)PCA；(B)载荷分析；(C)传感器响应值变化。

2.9 感官特征与理化性质之间的关系

为了确定梨的感官特征和理化性质之间的关系，通过偏最小二乘回归(PLSR)方法，分别建立了梨非挥发性指标和挥发性化合物(多自变量 X)与感官特征(多因变量 Y)之间的回归模型。

PLSR 分析首先揭示了红香酥梨非挥发性指标(X 变量；n=22)与除香味之外的感官特征(Y 变量；n=13)之间的关系，X 变量(R^2X=0.987)解释了 Y 变量(R^2Y=0.981)的变化(图 7(A))。PLSR 模型通过 200 次置换检验得到相应的 Q^2，Q^2 在 Y 轴上的截距均小于 0，表明该模型具有良好的拟合度和可预测性。Variable Importance in Projection(VIP)值是 PLSR 模型中筛选差异变量的重要指标，一般 VIP 值大于 1 的物质可作为区分不同贮藏时间红香酥梨的标志物，VIP 值大于 1 的指标如图 7(B)所示。由回归模型可知，贮藏 0 d 红香酥梨的感官特征表现为具

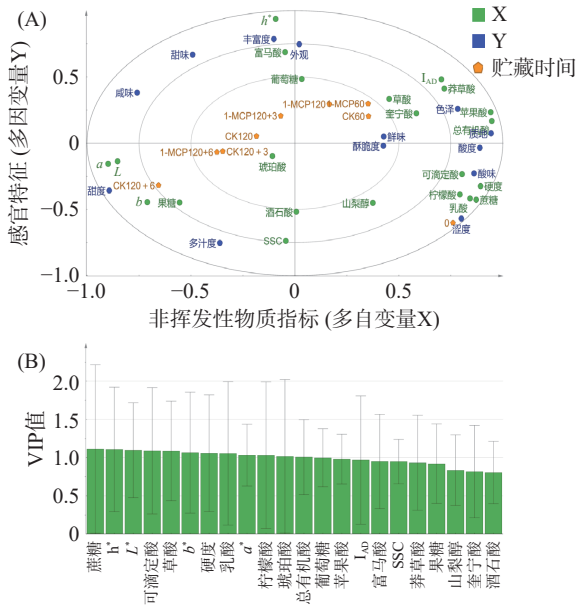


图 7　红香酥梨感官特征与非挥发性指标关系的 PLS 回归图和 VIP 值

Fig.7　PLS regression plot and VIP values of the relationship between sensory characteristics and non-volatile Indices of 'Hongxiangsu' pear

注：(A)红香酥梨与非挥发性指标的双标图；(B)VIP 值。

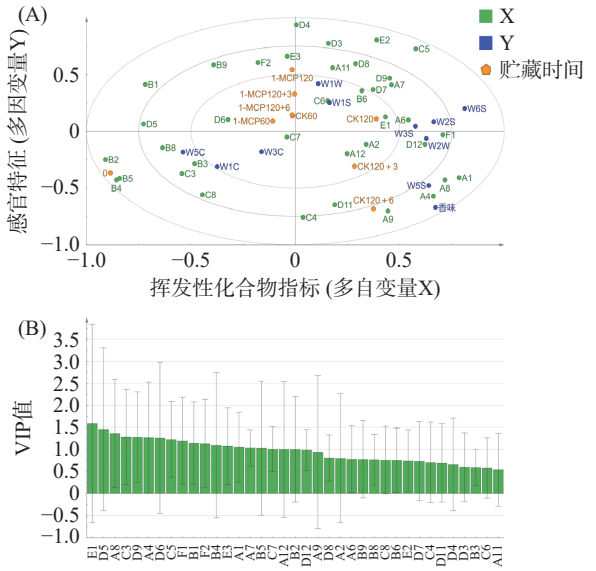


图 8　红香酥梨感官特征与果肉中挥发性指标关系的 PLS 回归图和 VIP 值

Fig.8　PLS regression plot and VIP values of the relationships between sensory attributes and volatiles of 'Hongxiangsu' pear flesh

注：(A)红香酥梨与果肉中挥发性指标的双标图；(B)VIP 值；A~F 依次为表 7 序号对应的挥发性物质。

有更高的酸度、涩度和质地，这与其乳酸、蔗糖、柠檬酸、苹果酸、可滴定酸含量和硬度等指标密切相关；Tedeschi 等[42]发现在‘Abate Fétel’梨中 1-MCP 处理有助于保持葡萄糖和果糖含量以及酸度和感官特征，本试验有着类似结果，冷藏期间 1-MCP 组的红香酥梨的感官特征具有更好的外观，这与其葡萄糖和富马酸指标密切相关。贮藏 120+6 d 时，CK 组的红香酥梨的感官特征具有更好的甜度，这与其果糖、色度 L^*值、a^*值和 b^*值指标密切相关。

进一步采用 PLSR 分析了红香酥梨果肉的挥发性指标（X 变量；n=51）与感官特征梨味（Y 变量；n=11）之间的关系，X 变量（R^2X=0.868）解释了 Y 变量（R^2Y=0.99）的变化（图 8(A)）。其中 VIP 大于 1 的挥发性物质如图 8(B)所示。挥发性指标与梨味感官特征的回归模型 PLS 回归模型通过 200 次置换检验进行验证，其 Q^2 回归线在 Y 轴上的截距小于 0，表明其具有良好的模型拟合度和可预测性。由该回归模型可知，不同贮藏时间红香酥梨的感官特征和果肉挥发性化合物明显不同。贮藏 0 d 的红香酥梨的香气与 B2 2-己烯醛、B4 辛醛、B5 壬醛等物质密切相关；1-MCP 组的红香酥梨具有相似的梨味，这与 C6 1-辛烯-3-醇、D6 1-乙基-3-甲基苯、E3 2-壬酮、F2 2-丁基四氢呋喃等物质密切相关。贮藏 120+6 d 的 CK 组红香酥梨感官香味和电子鼻传感器 W5S 密切相关，这与 A9 甲酸辛酯、D11 1,3-二叔丁基苯、A4 乙酸丁酯、A8 乙酸己酯、A1 丁酸甲酯等物质密切相关。

2.10　人工感官、智能感官检测及理化性质之间的关系

电子鼻、电子舌凭借其客观、高效的优点，可用于对梨果实贮藏过程中的感官品质进行批量筛查；而人工感官评价则能实现对风味特性的精准判断。为了进一步了解人工感官、智能感官及理化性质之间的相关性，本研究对红香酥梨果的硬度、SSC、TA、I_{AD}、色度、甜度值、总有机酸含量、香气物质含量、人工感官喜好度、电子鼻和电子舌结果进行相关性分析，Pearson 相关系数热图如图 9 所示，电子舌的酸味与质地、酸度、涩度、硬度、总有机酸和醛类物质含量呈正相关，与甜度、L^*值、a^*值、b^*值、酯类和

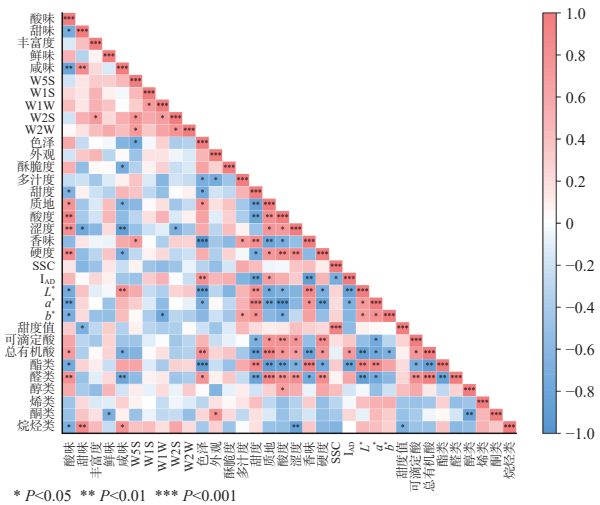


图 9　人工感官、智能感官及理化性质相关性分析热图

Fig.9　Correlation analysis heatmap of artificial sensory, intelligent sensory, and physicochemical properties

烷烃类物质含量呈负相关；甜味与烷烃类物质含量呈正相关，与涩度、甜度值呈负相关，说明电子舌的酸味强度可部分代替人工感官的质地、酸度、涩度评分。电子舌感应鲜味与酮类呈负相关；咸味与色差 L^*值、烷烃类物质呈正相关，与酥脆度、质地、涩度、总有机酸、醛类呈负相关。电子鼻传感器 W5S 与香味呈正相关，说明电子鼻传感器 W5S 可部分代替人工感官的香味评分。智能感官技术在识别复杂或异常风味方面能力、环境温湿度干扰等方面存在一定局限性，且无法直接反映人们基于这些感觉产生的感知[14]。本试验研究表明智能感官评价在一定程度上可有效反映传统人工感官评价方法，进而实现对梨果实感官特征的高效、精准且客观的量化表征[43]。

3 结论

本研究结果表明，1-MCP 处理有效抑制了红香酥梨贮藏期间 I_{AD}、可溶性糖含量，总有机酸含量的变化。红香酥梨贮藏期间酯类物质含量升高而醛类物质含量下降，1-MCP 处理显著影响酯类、醛类等关键香气组分的 VOCs 含量。1-MCP 处理通过抑制果皮褐变、延缓果实软化及酸度降解，有效维持了货架期感官外观、色泽、酥脆度与多汁性，但一定程度上抑制了感官甜度与香味的上升趋势。电子鼻传感器 W5S 与感官香味呈正相关。电子舌的酸味与感官质地、酸度和涩度，以及果肉硬度、总有机酸含量和醛类物质含量呈正相关，与甜度、L^*值、a^*值、b^*值、酯类和烷烃类呈负相关，表明智能感官评价值在一定程度上可有效反映传统人工感官评价结果。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] REILAND H, SLAVIN J. Systematic review of pears and health[J]. Nutrition Today, 2015, 50(6): 301−305.

[2] ZHOU Xin, DONG Ling, LI Rui, et al. Low temperature conditioning prevents loss of aroma-related esters from ‘Nanguo’ pears during ripening at room temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 23−32.

[3] 冯云霄, 何近刚, 程玉豆, 等. 成熟度对‘红香酥’梨冷藏及货架期品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4513−4519. [FENG Yunxiao, HE Jingang, CHENG Yudou, et al. Effect of different harvest maturity on quality of ‘Hongxiangsu’ pear during cold storage and subsequent shelf life[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4513−4519.]

[4] WANG Libin, WANG Li, ZHANG Zhen, et al. Genome-wide identification and comparative analysis of the superoxide dismutase gene family in pear and their functions during fruit ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 143: 68−77.

[5] XIE Xingbin, SONG Jiankun, WANG Yan, et al. Ethylene synthesis, ripening capacity, and superficial scald inhibition in 1-MCP treated ‘d’Anjou’ pears are affected by storage temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 97: 1−10.

[6] 王志华, 贾朝爽, 包敖民, 等. 1-MCP 对龙丰苹果常温贮藏保鲜的效应[J]. 中国果树, 2022(12): 8−13. [WANG Zhihua, JIA Chaoshuang, BAO Aomin, et al. Effect of 1-MCP on ‘Longfeng’ apple during normal temperature storage[J]. China Fruits, 2022(12): 8−13.]

[7] 王志华, 贾朝爽, 王文辉. PE 保鲜袋结合 1-甲基环丙烯、乙烯吸收剂对红香酥梨采后生理品质的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 115−124. [WANG Zhihua, JIA Chaoshuang, WANG Wenhui. Effects of PE film bags combined with 1-MCP, ethylene absorbent on postharvest physiological quality of hongxiangsu pear[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 115−124.]

[8] 陈华峰, 唐玉情, 潘亚婕, 等. 果实风味的代谢基础及其调控机制研究进展[J]. 植物研究, 2021, 41(3): 474−480. [CHEN Huafeng, TANG Yuqing, PAN Yajie, et al. Progress on the metabolic basis and regulation mechanism of fruit flavor[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(3): 474−480.]

[9] 陈美玉, 程红, 程玉豆, 等. 偏最小二乘回归解析黄冠梨贮藏期间风味品质与感官特征的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 231−243. [CHEN Meiyu, CHENG Hong, CHENG Yudou, et al. The change of flavor quality and sensory characteristics of ‘Huangguan’ Pear during storage analyzed by partial least squares regression[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 231−243.]

[10] LIU Yuan, WEN Huan, YANG Xiaoping, et al. Metabolome and transcriptome profiling revealed the enhanced synthesis of volatile esters in Korla pear[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 264.

[11] 李美萍, 李彩林, 王华瑞, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-嗅闻-质谱联用分析红香酥梨的香气成分[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 130−139. [LI Meiping, LI Cailin, WANG Huarui, et al. Analysis of aroma compounds in red fragrant pear by headspace solid phase micro-extraction and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 130−139.]

[12] FENG Yunxiao, CHENG Hong, CHENG Yudou, et al. Chinese traditional pear paste: Physicochemical properties, antioxidant activities and quality evaluation[J]. Foods, 2023, 12(1): 187.

[13] 窦文卿, 柴春祥, 鲁晓翔. 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 354−359. [DOU Wenqing, CHAI Chunxiang, LU Xiaoxiang. Research progress of non-destructive detection technique in fruit quality evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 354−359.]

[14] TORRICO D D, MEHTA A, BORSSATO A B. New methods to assess sensory responses: A brief review of innovative techniques in sensory evaluation[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 49: 100978.

[15] FENG Yihang, WANG Yi, BEYKAL B, et al. A mechanistic review on machine learning-supported detection and analysis of volatile organic compounds for food quality and safety[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104297.

[16] 张伯雅, 郑璞帆, 李晓雪, 等. 基于电子舌结合 GC-IMS 分析不同品种梨果实的风味成分差异[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(10): 109−118. [ZHANG Boya, ZHENG Pufan, LI Xiaoxue, et al. Analysis of flavor components differences in different varieties of pear fruits based on electronic tongue combined with GC-IMS[J]. Storage and Process, 2024, 24(10): 109−118.]

[17] MU Zhonghui, ZHU Yuzhang, RAN Li, et al. Characterization of the sensory evaluation system for fermented chili pepper (*Capsicum annuum* L.) using GC-O-MS and sensory analysis techniques[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2025, 40: 101191.

[18] 孙江艳, 刘义凤, 刘磊, 等. 食品感官评价的技术手段与应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 359−366. [SUN Jiangyan, LIU Yifeng, LIU Lei, et al. Analysis on the technical

means and application status of food sensory evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 359−366.]
[19] 王阳, 王志华, 王文辉, 等. 1-MCP 处理对几种脆肉梨果实贮藏品质及采后生理的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(S1): 147−156. [WANG Yang, WANG Zhihua, WANG Wenhui, et al. Effects of 1-methylcyclopropene(1-MCP) on quality and physical characteristics of crispy pears during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(S1): 147−156.]
[20] TIAN You, SUN Lijun, YANG Yali, et al. Changes in the physicochemical properties, aromas and polyphenols of not from concentrate (NFC) apple juice during production[J]. CyTA - Journal of Food, 2018, 16(1): 755−764.
[21] MA Chunmei, SUN Zhen, CHEN Changbao, et al. Simultaneous separation and determination of fructose, sorbitol, glucose and sucrose in fruits by HPLC–ELSD[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 784−788.
[22] 姚改芳, 张绍铃, 曹玉芬, 等. 不同栽培种梨果实中可溶性糖组分及含量特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4229−4237. [YAO Gaifang, ZHANG Shaoling, CAO Yufen, et al. Characteristics of components and contents of soluble sugars in pear fruits from different species[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(20): 4229−4237.]
[23] 许九红, 王修俊, 李佳敏, 等. 红酸汤原料番茄品种的筛选及发酵品质的综合评价[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 193−201. [XU Jiuhong, WANG Xiujun, LI Jiamin, et al. Screening of tomato varieties and comprehensive evaluation of fermentation quality of red sour soup[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 193−201.]
[24] LIU Yuan, XIANG Simin, ZHANG Haipeng, et al. Sensory quality evaluation of Korla pear from different orchards and analysis of their primary and volatile metabolites[J]. Molecules, 2020, 25(23): 5567.
[25] VILANOVA M, GENISHEVA Z, MASA A, et al. Correlation between volatile composition and sensory properties in Spanish Albariño wines[J]. Microchemical Journal, 2010, 95(2): 240−246.
[26] HONG S J, JEONG H, YOON S, et al. A comprehensive study for taste and odor compounds using electronic tongue and nose in broccoli stem with different thermal processing[J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(2): 191−201.
[27] 何近刚, 冯云霄, 程玉豆, 等. 1-甲基环丙烯对红星苹果常温贮藏期间生理、品质和电子鼻特性的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(1): 134−143. [HE Jingang, FENG Yunxiao, CHENG Yudou, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on the physiology, quality and electronic nose characteristic of starking delicious apple during ambient temperature storage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023, 38(1): 134−143.]
[28] 黄丽. 3 种梨贮藏期间果实品质、可溶性糖和有机酸含量变化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 46−52. [HUANG Li. Changes in fruit quality, soluble sugar and organic acid content of three pear species during storage[J]. Food Research and Development, 2023, 44(10): 46−52.]
[29] LWIN H P, LEE J. Differential effects of postharvest 1-MCP treatment on fruit quality and targeted major metabolites in long-term cold-stored 'Wonhwang' pears[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2022, 63(4): 499−513.
[30] DIAS C, RIBEIRO T, RODRIGUES A C, et al. Improving the ripening process after 1-MCP application: Implications and strategies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 113: 382−396.
[31] 沈艾彬, 刘皓玥, 张凯旋. 库尔勒香梨香气成分分析[J]. 中国食品工业, 2024(5): 113−115. [SHEN Aibin, LIU Haoyue, ZHANG Kaixuan. Analysis of aroma components in Korla fragrant pear[J]. China Food Industry, 2024(5): 113−115.]
[32] 吴丹丹, 林梦桦, 李亚辉, 等. '玉露香'梨不同采摘期及贮藏期果实品质变化分析[J]. 园艺学报, 2025, 52(6): 1553−1574. [WU Dandan, LIN Menghua, LI Yahui, et al. The fruit quality variation of 'Yuluxiang' pear at different picking stages and storage time[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(6): 1553−1574.]
[33] LÓPEZ-NICOLÁS J M, ANDREU-SEVILLA A J, CARBONELL-BARRACHINA A A, et al. Effects of addition of alpha-cyclodextrin on the sensory quality, volatile compounds, and color parameters of fresh pear juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(20): 9668−9675.
[34] XU Yuqing, GAO Guanwei, TIAN Luming, et al. Changes of volatile organic compounds of different flesh texture pears during shelf life based on headspace solid-phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Foods, 2023, 12(23): 4224.
[35] XU Jiayu, ZHANG Ying, HUO Hongliang, et al. Integrated omics reveal the mechanisms underlying softening and aroma changes in pear during postharvest storage and the role of melatonin[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 679.
[36] LI Guopeng, JIA Huijuan, LI Jihua, et al. Effects of 1-MCP on volatile production and transcription of ester biosynthesis related genes under cold storage in 'Ruanerli' pear fruit (*Pyrus ussuriensis* Maxim.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 168−174.
[37] 赵江丽, 何近刚, 岳盈肖, 等. 1-甲基环丙烯对'香水'梨果实品质和挥发性成分及相关基因表达的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 209−217. [ZHAO Jiangli, HE Jingang, YUE Yingxiao, et al. Effect of 1-methylcyclopene on quality and volatile organic components and related gene expression in 'Xiangshui' Pears[J]. Food Science, 2022, 43(15): 209−217.]
[38] 杨爽, 谢鸿林, 郑现容, 等. 1-甲基环丙烯处理导致跃变型果实成熟障碍影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 387−393. [YANG Shuang, XIE Honglin, ZHENG Xianrong, et al. Research advances of effects of 1-methylcyclopropene on fruit ripening obstacle[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 387−393.]
[39] MAO Yuezhong, TIAN Shiyi, QIN Yumei, et al. Sensory sweetness and sourness interactive response of sucrose-citric acid mixture based on synergy and antagonism[J]. npj Science of Food, 2022, 6: 33.
[40] 戚淑叶, 毛岳忠, 耿利华, 等. 现有电子舌设备的技术现状与发展趋势[J]. 药学学报, 2023, 58(11): 3165−3172. [QI Shuye, MAO Yuezhong, GENG Lihua, et al. Technical status and development trends of electronic tongue[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2023, 58(11): 3165−3172.]
[41] 穆申玲, 沈文锋, 吕大伍, 等. 电子鼻技术及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(14): 56−69. [MU Shenling, SHEN Wenfeng, LÜ Dawu, et al. Advancements in electronic nose technology and is applications[J]. Materials Reports, 2024, 38(14): 56−69.]
[42] TEDESCHI P, MARZOCCHI S, MARCHETTI N, et al. Influence of post-harvest 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment and refrigeration on chemical composition, phenolic profile and antioxidant modifications during storage of abate Fétel pears[J]. Antioxidants, 2023, 12(11): 1955.
[43] 冯建英, 李鑫, 原变鱼, 等. 智能感官技术在水果检测中的应用进展及趋势[J]. 南方农业学报, 2020, 51(3): 636−644. [FENG Jianying, LI Xin, YUAN Bianyu, et al. Progress and trend of fruit detection by intelligent sensory technology[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(3): 636−644.]