

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

陈美玉^{1,2}, 程红², 程玉豆², 田夏雨^{1,2}, 张子申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 056000)

(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: 为了研究黄冠梨贮藏期间风味品质和感官特征的变化, 该文运用风味品质分析和感官评价并结合偏最小二乘回归 (PLSR) 的方法解析了影响黄冠梨贮藏期间感官特征变化的风味化合物。研究表明, 黄冠梨通过 90 d 的冷藏和 7 d 的货架贮藏, 果肉中的葡萄糖含量由 14.73 mg/g 升至 18.29 mg/g, 总酸含量由 4.07 mg/g 降至 2.43 mg/g, 苹果酸、柠檬酸和奎宁酸的含量分别由 1.98、1.02、0.82 mg/g 降至 1.38、0.64、0.26 mg/g; 同时, 果皮和果肉中的酯类、醇类和烯类物质含量增多, 醛类物质含量减少。感官评价结果表明, 冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨的甜度和梨味感官特征上升, 外观、酸度和硬度等感官特征下降; PLSR 进一步解析了影响黄冠梨感官特征的关键化合物。此外, 电子舌结果发现冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨的甜味上升, 酸味和涩味下降; 电子鼻结果表明贮藏 0 d 黄冠梨的香气特征与冷藏 90 d 与货架 7 d 的香气特征具有显著差异。综上, 该研究揭示了黄冠梨风味品质和感官特征之间的关系, 为梨果实风味品质评价提供了理论依据。

关键词: 黄冠梨; 风味物质; 感官评价; 电子鼻; 电子舌

文章编号: 1673-9078(2025)12-231-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1311

Partial Least Squares Regression Analysis of the Flavor Quality and Sensory Characteristics of 'Huangguan' Pear during Storage

CHEN Meiyu^{1,2}, CHENG Hong², CHENG Yudou², TIAN Xiayu^{1,2},

ZHANG Zishen², WANG Yongxia^{1*}, GUAN Junfeng^{2*}

(1. College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

(2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Changes in the flavor quality and sensory characteristics of 'Huangguan' pear during storage remain poorly understood. To address this gap in our knowledge, flavor compounds in stored pears were analyzed using flavor quality analysis and sensory evaluation combined with partial least squares regression (PLSR). After 90 d of cold storage and 7 d of shelf storage, the glucose content in the pear flesh increased from 14.73 to 18.29 mg/g, the total acid content decreased from 4.07 to 2.43 mg/g, and the

引文格式:

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. Partial least squares regression analysis of the flavor quality and sensory characteristics of 'Huangguan' pear during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 231-243.

收稿日期: 2024-09-03; 修回日期: 2024-10-21; 接受日期: 2024-10-22

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); 河北省国际科技合作基地建设专项资金

作者简介: 陈美玉(2000-), 女, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: cmy20000128@126.com

通讯作者: 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; 共同通讯作者: 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

malic acid, citric acid, and quinic acid contents decreased from 1.98, 1.02, and 0.82 mg/g to 1.38, 0.64, and 0.26 mg/g, respectively. The ester, alcohol, and alkene contents increased, whereas the aldehyde content decreased in both pear flesh and peel. The sweetness and aroma sensory attributes increased, whereas the appearance, sourness, and hardness sensory attributes decreased after 90 d of cold storage and 7 d of shelf storage. PLSR was used to screen vital variables affecting the sensory attributes of the ‘Huangguan’ pear. Electronic tongue results revealed that sweetness increased, whereas acidity and astringency decreased after storage. The aroma characteristics 0 d post-storage were notably different from the aroma characteristics after 90 d of cold storage and 7 d of shelf storage. The results elucidate the relationships between the flavor quality and sensory characteristics of the ‘Huangguan’ pear, providing a theoretical basis for future flavor quality evaluations.

Key words: ‘Huangguan’ pear; flavor substance; sensory evaluation; electronic nose; electronic tongue

我国梨树栽培历史悠久, 品种资源丰富, 种植面积和产量均居世界首位^[1]。梨果实因良好的风味和营养价值, 广受消费者的喜爱。黄冠梨是我国主栽梨品种之一, 且以河北省为主要产区, 果实呈椭圆形, 果肉洁白, 酸甜适口, 并带有淡淡的香味^[2]。这些特点使黄冠梨在市场上具有极高的竞争力, 并成为消费者喜爱的梨品种之一。糖类、有机酸和香气物质是影响梨果实风味品质的重要因素^[3]。其中, 糖和酸作为梨果实中的主要风味物质, 其组成和含量直接影响梨果实的口感; 香气也是影响梨果实品质和感官特征的重要指标。随着现代农业技术的发展, 探寻影响水果感官品质的风味物质, 成为当前的研究热点。

感官评价有助于了解产品的感官特征以及消费者的需求和喜好, 对于产品的研发、生产、消费过程具有重要的指导意义^[4]。传统的人工感官评价方法主要依赖于评价员的直接感知, 这种方法能直观捕捉到食品的感官特征, 但是目前尚存在一些问题, 如品评人员训练成本较高, 准备和取样工作繁琐, 同时可能因不同评估员的主观因素造成结果存在差异^[5]。近年来, 智能感官技术在食品品质评价领域展现出了巨大的潜力, 该技术以食品样品作为检测对象, 利用传感器获取品评样品的各种感官属性, 进一步结合智能识别算法和信号处理, 实现食品品质拟人化综合评价^[6]。在食品领域, 智能感官技术主要包括模拟味觉感知、对食品的味觉特征进行精准分析的电子舌技术以及模拟嗅觉感知、识别并量化食品的整体气味特征电子鼻技术等^[7], 这些技术的应用为黄冠梨的感官特征评价提供了新的思路和方法。

随着气相色谱-质谱联用(GC-MS)和高效液相色谱(HPLC)等技术的发展^[8], 水果中与感官特征相关的风味物质逐渐被揭示。Kim等^[9]采用代谢组学分析和感官评价相结合的方法, 揭示了影响苹果风味的主要挥发性和非挥发性化合物。Zhou等^[10]采用风味感官组学方法, 对14种鲜食葡萄香气的形成机理进行了

研究。Liu等^[11]采用模糊逻辑感官评价法, 揭示了与库尔勒香梨感官品质密切相关的代谢产物。

本文运用风味品质分析和感官评价并结合偏小二乘回归分析(PLSR)的化学计量学方法, 以期解析影响黄冠梨贮藏期间感官特征变化的关键风味化合物, 同时本文在感官评价时不仅使用了传统的人工感官评价方法, 还采用了电子鼻和电子舌的智能感官评价方法, 探寻智能感官在梨果感官评价方面的潜力。为揭示影响黄冠梨贮藏期间果实感官特征变化的风味物质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄冠梨于2023年8月10日采收于河北省石家庄市赵县, 挑选无机械损伤和病虫害的果实, 次日进入 $(0\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 冷库中冷藏备用, 冷藏90 d后, 取出果实于 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 进行货架7 d的试验。贮后0 d指采收后于室温下放置过夜的黄冠梨, 冷藏90 d指在冷库中冷藏了90 d的黄冠梨, 货架7 d指冷藏90 d后继续转货架期放置7 d的黄冠梨。

乙腈(色谱纯), 默克股份有限公司; 天津市大陆化学试剂厂; 硝酸铝(分析纯), 上海贤鼎生物科技有限公司; 没食子酸(均为分析纯), BBI生命科学有限公司; 3-壬酮(色谱纯), 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司; 福林酚试剂(分析纯), 北京酷来搏科技有限公司; 酒石酸(色谱纯)、碳酸钠、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; 亚硝酸钠(分析纯)、葡萄糖、山梨醇、蔗糖(均为色谱纯), 上海易恩化学试剂有限公司; 果糖, 上海阿达玛斯试剂有限公司; 芦丁、柠檬酸、苹果酸、奎宁酸、琥珀酸、乳酸、莽草酸、草酸、富马酸(均为色谱纯), 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。

1.2 仪器与设备

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; UV-2600 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; D37520 高速冷冻离心机, 北京博励行仪器有限公司; SA-4028 型电子舌, 日本 Insent 公司; PEN3 型电子鼻, 德国 Airsense 公司; Agilent-1260 高效液相色谱, 美国 Agilent 公司; HITACHIL-2200 高效液相色谱仪, 日本日立公司; GCMS-TQ8040 气相色谱质谱联用仪, 日本株式会社岛津制作所。

1.3 实验方法

1.3.1 样品的制备

分别将贮后 0 d、冷藏 90 d 和货架 7 d 的皇冠梨果实仔细切分果皮和果肉, 经液氮速冻后, -80°C 冰箱冻藏, 备用。

1.3.2 基础理化指标的测定

采用 GY-4 型硬度计测定梨果实硬度, 单位 N; 采用 PAL-I 型手持数字糖度仪测定可溶性固形物含量 (SSC); 采用酸碱滴定法^[12]测定可滴定酸 (TA) 质量分数, 结果以 % 表示; 使用 CR-400 色度仪测定果皮颜色的变化, 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。

1.3.3 糖类物质和有机酸的测定

参照杨志国等^[13]的方法测定糖类化合物。准确称取经液氮冷冻后研磨的样品 1.0 g 于离心管中, 加入去离子水 4 mL, 沸水浴灭酶 10 min, 加入 PVPP 0.3 g, 涡旋混匀 30 s, 于 4°C 冰箱中静置 4 h 后 10 000 g 离心 10 min, 取 1 mL 上清液加入 4 mL 乙腈摇匀, 过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜, 并根据标准曲线换算, 得到糖类化合物的含量, 结果以质量浓度 mg/g 表示。采用 Agilent-1260 高效液相色谱进行测定, 分析条件如下: 检测器: 折光示差检测器; 色谱柱: CAPCELL PAKNH2-UG8 ($5\text{ }\mu\text{m}$, $4.6\text{ mm}\times 250\text{ mm}$); 流动相: 体积分数为 85% 的乙腈 (V/V); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 35°C ; 进样量: 20 μL 。甜度值 = $1.75\times\text{果糖} + 0.4\times\text{山梨醇} + 0.7\times\text{葡萄糖} + 1\times\text{蔗糖}$ 。

参照许九红等^[14]的方法测定有机酸。准确称取经液氮冷冻后研磨的样品 1.0 g 于离心管中, 加入去离子水 5 mL, 超声提取 30 min 后 10 000 g 离心 10 min, 过

$0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜, 并根据标准曲线换算。得到有机酸含量, 结果以质量浓度 mg/g 表示。采用 HITACHIL-2200 高效液相色谱仪进行测定, 分析条件如下: 色谱柱: ADMEHR C18 ($5\text{ }\mu\text{m}$, $250\text{ mm}\times 4.6\text{ mm}$); 流动相: 20 mmol/L 磷酸二氢铵溶液 (pH 值 2.50); 流速: 0.80 mL/min; 检测波长 210 nm, 进样量 10 μL 。

1.3.4 总酚 (TPC) 及总黄酮 (TFC) 的测定

参照 Zhang 等^[15]的方法测定果肉中的总酚含量 (TPC), 准确称取经液氮冷冻后研磨的样品 1.0 g 于离心管中, 加入体积分数为 70% 的乙醇 5.0 mL, 充分摇匀, 于 40°C 水浴中超声提取 1.5 h 后 10 000 g 离心 15 min, 取上清液作为样品溶液, 吸取 1.0 mL 上清液, 加入 1 mol/L 的福林酚溶液 2.0 mL, 摇匀后静置 5 min, 依次加入质量分数为 7.5% Na_2CO_3 溶液 2.0 mL, 蒸馏水 5.0 mL, 摇匀, 避光反应 1 h, 采用 UV-2600 紫外可见分光光度计于 765 nm 测定吸光度, 以没食子酸为标品, 作标准曲线, 结果以质量浓度 mg GAE/g 表示。

参照 Wang 等^[16]的方法测定果肉中的总黄酮含量 (TFC), 准确称取经液氮冷冻后研磨的样品 1.0 g 于离心管中, 加入体积分数为 70% 的乙醇 5.0 mL, 充分摇匀, 于 40°C 水浴中超声提取 1.5 h 后 10 000 g 离心 15 min, 取上清液作为样品溶液, 吸取 1.0 mL 上清液, 加入 4 mL 去离子水, 加入质量分数为 5% 的 NaNO_2 溶液 0.5 mL, 摇匀静置 6 min 后加入质量分数为 10% 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液 0.5 mL, 摇匀静置 6 min 后加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液 4 mL, 摇匀后避光稳定 20 min, 采用 UV-2600 紫外可见分光光度计于 510 nm 处测定吸光度, 以芦丁为标品, 作标准曲线, 结果以质量浓度 mg RE/g 表示。

1.3.5 电子鼻数据采集

参照何近刚等^[17]的方法测定皇冠梨整果的香气特征。将皇冠梨果实分为 3 组, 每组约重 1.5 kg, 置于 6 L 干燥密封罐内。密封 2 h 后, 用 PEN3 型电子鼻探头测定挥发性物质。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 90~92 s 的稳定响应值进行分析。

1.3.6 电子舌数据采集

参照 Hong 等^[7]的方法测定皇冠梨汁的滋味。取鲜榨梨汁样品 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、苦味、涩味、咸味、丰富度、鲜味、涩味回味和苦味回味。

1.3.7 挥发性物质测定

参照 Liu 等^[11]的方法测定挥发性物质。分别称取 4 g 果肉、1 g 果皮经液氮冷冻后研磨的样品于顶空瓶中，分别加入 6、8 mL 氯化钠饱和溶液，再加入 200 μ L 的 3- 壬酮溶液（质量浓度为 1 μ g/mL，内标物质），40 $^{\circ}$ C 孵育 30 min，结果以质量浓度 μ g/kg 表示。

气相色谱条件：接口温度 250 $^{\circ}$ C，进样口温度 250 $^{\circ}$ C，解析 3 min；载气为 He，载气流量 3 mL/min；进样方式为 Q3SCAN 自动无分流进样的方式。程序升温：初温 40 $^{\circ}$ C，保持 1 min，以 2 $^{\circ}$ C /min 速率升到 100 $^{\circ}$ C，再以 4 $^{\circ}$ C /min 升至 190 $^{\circ}$ C，保持 2 min，最后以 10 $^{\circ}$ C /min 速率升到 230 $^{\circ}$ C，保持 5 min。色谱柱型号：SH Rxi-5Sil-MS，膜厚 0.25 μ m，内径 0.25 mm，长度 30.0 m。质谱条件：电离方式为电子轰击电离，离子源温度为 200 $^{\circ}$ C，电子轰击能为 70 eV；扫描质荷比范围为 45~500。定性分析：通过匹配质谱数据库 NIST17 进行定性分析；定量分析：通过内标法进行定量分析。

1.3.8 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^[4]，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。感官评价时要求评价员参照标准品对梨的不同感官特征进行评价，首先将梨果实置于若干个 1 L 的干燥密封罐内，密封 1 h 后进行香气和外观特征的感官评价；之后将去核的梨果实沿纵线方向等分，并随机呈递给评价员，分别进行果肉色泽、口感（硬度、酥脆度和多汁度）和滋味（甜度、酸度和涩度）特征的感官评价。不同感官特征的标准样品分别为：乐事薯片为酥脆度的最强标准，奶油为硬度的最弱标准，西瓜为多汁度的最强标准，质量分数为 3% 的蔗糖溶液（*m/V*）为甜度的最弱标准，质量分数为 0.043% 的柠檬酸溶液（*m/V*）为酸度的最弱标准，质量分数为 0.03% 的明矾溶液（*m/V*）为涩度的最弱标准和体积分数为 3% 的乙酸己酯溶液（*V/V*）为梨味最强标准。感官评价采用 10 点标度法，且允许多次品尝及嗅闻。

1.4 数据处理

实验数据为 3 次测定的平均值，结果用平均值 $\pm$ 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，并通过邓肯多重检验表示组间显著性差异（*P* < 0.05），采用 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 基础理化指标

黄冠梨贮后 0 d、冷藏 90 d 及货架 7 d 的理化指标和色差分析如表 1 和表 2 所示。同贮后 0 d 相比，冷藏 90 d 黄冠梨的硬度和 TA 含量略有下降；同冷藏 90 d 相比，货架 7 d 的黄冠梨硬度无明显变化，TA 含量略有下降；此外与贮后 0 d 的黄冠梨相比，冷藏 90 d 和货架 7 d 的 SSC 和甜度值均无明显变化。由黄冠梨的色差分析结果可知，黄冠梨的色度参数（*L**、*b** 和 *h* $^{\circ}$ ）在贮藏过程中没有明显差异，但是与贮后 0 d 的黄冠梨相比，冷藏 90 d 和货架 7 d 的 *a** 略有上升， Δa 为正，表明冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨颜色偏红，这与黄冠梨冷藏后出现少量褐斑有关。

表 1 黄冠梨的基础理化指标

Table 1 Physicochemical characteristic of ‘Huangguan’ pear				
处理组	硬度 /N	SSC/ $^{\circ}$ Brix	甜度值	TA/%
贮后 0 d	58.74 $\pm$ 1.79 ^a	10.23 $\pm$ 0.09 ^a	101.52 $\pm$ 5.18 ^a	0.10 $\pm$ 0.01 ^a
冷藏 90 d	53.49 $\pm$ 0.93 ^b	10.40 $\pm$ 0.21 ^a	98.62 $\pm$ 2.97 ^a	0.08 $\pm$ 0.01 ^b
货架 7 d	51.61 $\pm$ 2.29 ^b	10.30 $\pm$ 0.15 ^a	94.35 $\pm$ 1.01 ^a	0.07 $\pm$ 0.01 ^c

注：右肩不同小写字母表示同列差异显著（*P* < 0.05）。下表同。

表 2 黄冠梨的色差分析

Table 2 Color parameters of ‘Huangguan’ pear				
处理组	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>h</i> $^{\circ}$
贮后 0 d	78.52 $\pm$ 0.36 ^a	-5.16 $\pm$ 0.08 ^b	27.71 $\pm$ 0.57 ^a	169.43 $\pm$ 0.05 ^a
冷藏 90 d	76.79 $\pm$ 1.34 ^a	-3.61 $\pm$ 0.59 ^a	26.37 $\pm$ 0.24 ^b	172.16 $\pm$ 1.25 ^a
货架 7 d	78.42 $\pm$ 0.44 ^a	-3.01 $\pm$ 0.08 ^a	27.11 $\pm$ 0.29 ^{ab}	173.55 $\pm$ 0.20 ^a

2.2 糖类物质含量

糖类物质是影响水果风味和口感的重要成分，特别是蔗糖、葡萄糖和果糖，决定了水果的甜度^[18]。黄冠梨中的糖类物质主要包括果糖、山梨醇、葡萄糖和蔗糖，其含量如图 1 所示。黄冠梨贮后 0 d 时果糖含量最高，为 43.38 mg/g；蔗糖含量最低，为 5.15 mg/g，山梨醇和葡萄糖含量接近，分别为 25.36 mg/g 和 14.73 mg/g。王勇等^[19]的研究中也发现黄冠梨中果糖含量最高，蔗糖含量最低。此外，同贮后 0 d 相比，冷藏 90 d 的糖类物质含量均无明显变化。而同冷藏 90 d 相比，货架 7 d 黄冠梨的山梨醇含量由 22.95 mg/g 降至 19.93 mg/g，蔗糖含量由 5.08 mg/g 降至 1.90 mg/g，果糖和葡萄糖含量不变；同贮后 0 d 相比，货架 7 d 葡萄糖含量由 14.73 mg/g 升至 18.29 mg/g。黄丽等^[1]的

研究同样发现红香酥梨在贮藏过程中蔗糖含量下降,葡萄糖含量上升,这可能是由于果实中分解蔗糖的酶将蔗糖转化为葡萄糖,从而使蔗糖含量降低,葡萄糖含量上升。

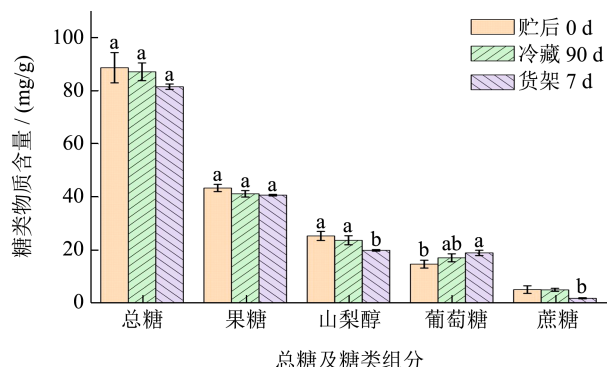


图1 黄冠梨的糖类物质含量

Fig.1 The sugar content of 'Huangguan' pear

注: 不同小写字母表示同一组分不同时间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

2.3 有机酸含量

有机酸也是影响水果风味和口感的重要成分,梨果实中的有机酸主要是苹果酸和柠檬酸^[20], 本研究中,黄冠梨果实中含量最高的有机酸为苹果酸,因此属于苹果酸优势型梨品种。如图2所示,贮藏0 d时黄冠梨中苹果酸含量最高,为1.98 mg/g,富马酸含量最低,为0.002 4 mg/g,韩彦肖等^[21]的研究同样发现黄冠梨中苹果酸含量最高。同贮藏0 d相比,冷藏90 d黄冠梨的总酸、柠檬酸、奎宁酸和草酸含量分别由1.98、1.02、0.82 mg/g降至1.38、0.64、0.26 mg/g,前述测定结果同样发现黄冠梨的TA在冷藏90 d后降低。同冷藏90 d的黄冠梨相比,货架7 d的苹果酸和富马酸含量分别由1.73 mg/g和0.002 3 mg/g降至1.38 mg/g和0.002 mg/g,其余均无明显变化。果实中有机酸含量下降的原因可能是有机酸在贮藏过程中一部分转化为糖,另一部分转化为二氧化碳和水^[1]。

2.4 总酚含量 (TPC) 和总黄酮含量 (TFC)

类黄酮和酚酸都属于酚类物质,是果蔬中主要的生物活性物质^[22]。同贮藏0 d相比,冷藏90 d的黄冠梨TPC由0.09 mg GAE/g降至0.05 mg GAE/g,如图3所示, Mery等^[22]也发现丑梨在冷藏贮藏过程中TPC下降,这可能是由于在冷藏条件下,多酚氧化酶的活性仍然保持在一定水平,在这些酶的催化作用下,多酚类物质发生氧化反应,导致TPC下降;同冷藏90 d相比,货架7 d的黄冠梨TPC显著上升,白雪蓉等^[23]同样发现库尔勒香梨在货架期贮藏期间TPC上

升,这是因为货架期温度较高,代谢旺盛,刺激了果实内部多酚类物质的合成^[24]。TFC无明显变化。

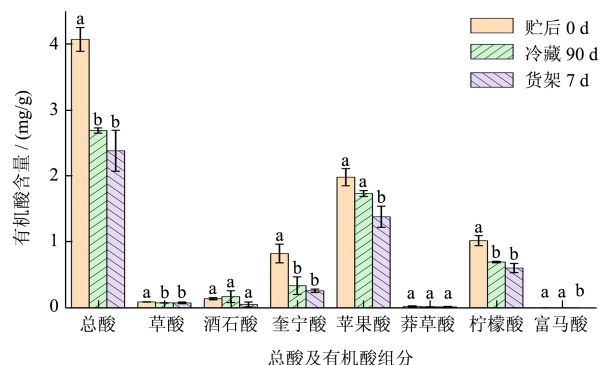


图2 黄冠梨的有机酸化合物含量

Fig.2 Organic acid content of 'Huangguan' pear

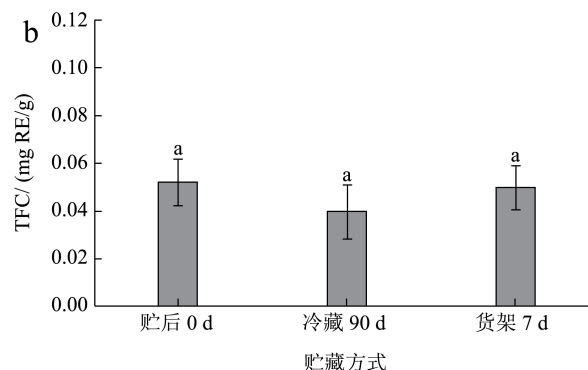
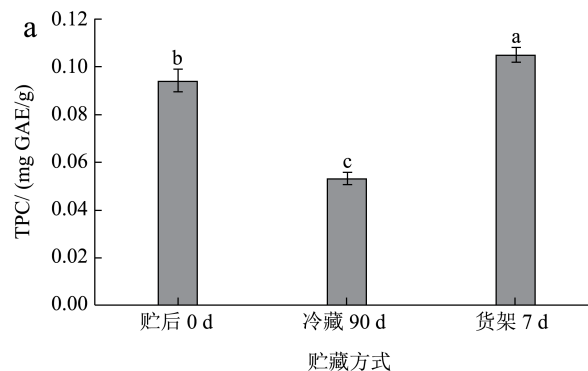


图3 黄冠梨的总酚及总黄酮含量

Fig.3 Total phenolic and total flavonoid content of 'Huangguan' pear

注: a 为总酚; b 为总黄酮。

2.5 挥发性物质含量

黄冠梨果肉中共检测出51种化合物,其中酯类13种、醛类14种、醇类9种、烯类4种、酮类6种和烷烃类5种;果皮中共检测出48种化合物,其中酯类8种、醛类14种、醇类12种、烯类5种、酮类6种和烷烃类4种。如图4所示,相对来说,果皮中香气物质的含量显著高于果肉中香气物质的含量,且冷藏90 d和货架7 d果皮中香气物质总量相似、均显著高于贮藏0 d的香气物质总量(表3)。

表 3 黄冠梨挥发性物质成分的组成与含量

Table 3 Volatile compound content of 'Huangguan' pear											
序号	中文名称	保留时间/ min	保留指数		果肉/(μg/kg)			果皮/(μg/kg)			气味
			文献值	计算值	贮藏 0 d	冷藏 90 d	货架 7 d	贮藏 0 d	冷藏 90 d	货架 7 d	
1	丁酸甲酯	3.632	982	—	0.12 ± 0.02 ^a	—	—	—	—	—	苹果气
2	乙酸丁酯	5.95	804	—	—	0.09 ± 0.01 ^a	—	—	—	—	果香
3	2-甲基丁酸乙酯	7.225	830	—	—	—	0.28 ± 0.03 ^a	—	—	—	青草味、苹果味
4	3-甲基-2-丁烯-1-醇乙酸酯	8.677	902	—	—	0.07 ± 0.01 ^b	0.17 ± 0.03 ^a	—	—	—	苹果、香蕉香气
5	乙酸戊酯	10.205	—	1 107	—	0.07 ± 0.03 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	—	—	—	香蕉气
6	3-甲基-3-丁烯-1-醇乙酸酯	10.61	1 180	1 115	—	0.05 ± 0.03 ^a	—	—	—	—	果香
7	己酸甲酯	10.786	1 169	1 118	0.91 ± 0.06 ^b	—	—	—	1.90 ± 0.20 ^a	—	菠萝香气
8	己酸乙酯	15.141	1 205	1 204	—	0.18 ± 0.02 ^c	0.50 ± 0.03 ^c	—	2.19 ± 0.32 ^b	8.57 ± 0.72 ^a	愉悦气
9	(Z)-3-己烯-1-醇-乙酸酯	15.361	1 206	1 208	0.31 ± 0.06 ^b	—	—	4.12 ± 0.08 ^a	0.81 ± 0.03 ^b	0.53 ± 0.09 ^b	青草香气
10	乙酸己酯	16.005	1 235	1 219	0.75 ± 0.11 ^c	1.29 ± 0.09 ^b	1.38 ± 0.04 ^b	1.42 ± 0.05 ^b	6.75 ± 0.35 ^a	6.85 ± 0.44 ^a	果味
11	乙酸庚酯	22.723	1 360	1 332	—	—	0.03 ± 0.01 ^a	—	—	—	青草香气
12	辛酸甲酯	23.488	1 352	1 344	—	0.30 ± 0.01 ^c	0.17 ± 0.02 ^c	—	1.54 ± 0.13 ^a	1.17 ± 0.03 ^b	酒味、果味
13	2-乙基己酯乙酸酯	25.156	1 420	1 371	—	0.16 ± 0.03 ^a	0.16 ± 0.02 ^a	—	—	—	果味
14	苯甲酸乙酯	26.426	1 172	1 192	—	—	—	—	1.67 ± 0.09 ^a	—	芳香气
15	十一烷酸乙酯	28.684	1 503	1 481	—	—	—	—	—	1.28 ± 0.21 ^a	果香花香
16	(E,Z)-2,4-癸二烯酸乙酯	42.117	1 553	1 397	—	—	—	—	2.36 ± 0.46 ^a	0.44 ± 0.07 ^b	果香
1	己醛	5.528	812	—	129.70 ± 18.39 ^c	43.47 ± 2.38 ^c	81.31 ± 2.47 ^c	1 098.59 ± 94.26 ^a	640.83 ± 38.21 ^b	1 098.17 ± 73.12 ^a	青草香气
2	(E)-2-己烯醛	7.331	820	—	0.45 ± 0.14 ^c	0.60 ± 0.12 ^c	12.14 ± 0.61 ^a	2.46 ± 0.15 ^b	—	—	青草香气
3	2-己烯醛	7.411	855	—	50.15 ± 2.25 ^c	23.07 ± 2.75 ^c	—	562.37 ± 17.64 ^a	565.50 ± 34.22 ^a	216.11 ± 2.14 ^b	青草香气
4	庚醛	9.612	882	—	0.26 ± 0.11 ^b	—	—	1.54 ± 0.50 ^a	—	—	果香
5	4-氧代-2-己烯醛	11.118	985	976	—	—	—	6.12 ± 0.64 ^a	—	2.63 ± 0.26 ^b	无明显气
6	(E)-2-庚醛	12.472	1 165	1 152	—	—	1.06 ± 0.11 ^c	—	2.73 ± 0.13 ^b	5.81 ± 0.68 ^a	—
7	苯甲醛	12.717	1 212	1 157	—	—	—	1.46 ± 0.20 ^a	—	—	苦杏仁味
8	辛醛	15.434	1 255	1 209	0.31 ± 0.08 ^b	—	—	1.70 ± 0.13 ^a	—	—	脂肪、柑橘、蜂蜜气
9	(E,E)-2,4-庚二烯醛	15.911	1 292	1 217	—	—	—	9.30 ± 0.60 ^a	—	—	青草香气
10	(E)-2-辛烯醛	18.905	1 392	1 268	0.62 ± 0.11 ^d	1.18 ± 0.45 ^c	1.33 ± 0.09 ^c	2.85 ± 0.39 ^b	1.67 ± 0.11 ^c	5.79 ± 0.54 ^a	青草香气
11	壬醛	22.237	1 354	1 324	0.96 ± 0.03 ^d	1.16 ± 0.07 ^d	1.04 ± 0.04 ^d	18.30 ± 0.37 ^a	5.03 ± 0.29 ^c	8.14 ± 0.36 ^b	橙玫瑰气
12	(E)-2-壬烯醛	25.94	1 497	1 384	0.12 ± 0.04 ^c	1.69 ± 0.16 ^a	1.06 ± 0.14 ^b	—	—	—	紫罗兰香气
13	癸醛	29.089	1 455	1 435	0.53 ± 0.05 ^d	0.93 ± 0.16 ^c	0.88 ± 0.10 ^c	1.77 ± 0.15 ^b	2.03 ± 0.08 ^a	2.10 ± 0.06 ^a	脂肪、柑橘气
14	(E)-2-癸烯醛	32.738	1 592	1 495	—	0.05 ± 0.02 ^b	0.07 ± 0.01 ^b	—	—	1.17 ± 0.04 ^a	蜡质橙香气
15	十一醛	35.272	1 580	1 544	—	0.03 ± 0.01 ^a	—	—	—	—	甜味、脂肪味、花香
16	(E,E)-2,4-癸二烯醛	35.714	1 478	1 553	—	0.04 ± 0.02 ^b	0.09 ± 0.02 ^a	—	—	—	甜橙气
17	(E)-2-十一烯醛	37.85	1 350	1 311	—	0.08 ± 0.03 ^a	0.08 ± 0.02 ^a	—	—	—	脂肪、柠檬香气

续表3

序号	中文名称	保留时间/ min	保留指数		果肉(μg/kg)			果皮(μg/kg)			气味
			文献值	计算值	贮藏 0 d	冷藏 90 d	货架 7 d	贮藏 0 d	冷藏 90 d	货架 7 d	
1	1-己醇	8.14	867	—	4.58 ± 0.21 ^c	—	—	7.55 ± 0.29 ^a	5.93 ± 0.65 ^b	3.50 ± 0.21 ^d	草木味
2	3-甲基-1-庚醇	10.218	1 041	1107	—	—	—	—	—	0.69 ± 0.12 ^a	—
3	1-辛烯-3-醇	14.06	965	965	0.14 ± 0.02 ^c	0.27 ± 0.11 ^c	0.26 ± 0.05 ^c	0.56 ± 0.06 ^b	1.38 ± 0.10 ^a	1.30 ± 0.08 ^a	玫瑰香气
4	2-癸烯-1-醇	15.35	1 251	1 208	—	0.39 ± 0.06 ^c	0.43 ± 0.02 ^c	—	1.51 ± 0.11 ^b	2.32 ± 0.07 ^a	橙玫瑰梨味
5	2-乙基-1-己醇	17.199	1 010	1 239	0.65 ± 0.13 ^d	22.80 ± 4.75 ^e	20.24 ± 1.43 ^c	5.49 ± 0.36 ^d	183.22 ± 10.97 ^a	167.81 ± 6.63 ^b	脂肪花香、果香
6	(Z)-2-壬烯-1-醇	19.699	—	1 282	—	0.10 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.01 ^a	—	—	—	甜瓜香气
7	1-癸醇	19.933	1 258	1 286	—	0.17 ± 0.02 ^b	0.21 ± 0.01 ^b	—	—	1.91 ± 0.33 ^a	橙玫瑰梨味
8	芳樟醇	21.853	1 270	1 318	2.61 ± 0.19 ^d	—	0.43 ± 0.08 ^c	26.90 ± 0.63 ^a	3.41 ± 0.48 ^c	6.60 ± 0.38 ^b	绿茶香气
9	3-乙基-3-辛醇	24.396	—	1 359	—	0.04 ± 0.01 ^a	—	—	—	—	—
10	(Z)-4-癸烯-1-醇	25.848	1 457	1 402	—	—	—	—	—	6.13 ± 0.46 ^a	果香
11	1-十二烷醇	33.478	1 258	1 402	—	—	—	—	—	0.70 ± 0.61 ^a	花香、果香
12	α-松油醇	28.198	—	1 421	0.39 ± 0.02 ^b	—	—	7.47 ± 0.27 ^a	—	—	丁香香气
13	2-己基-1-癸醇	46.719	1 790	1 848	—	—	—	—	1.93 ± 0.14 ^a	2.18 ± 0.16 ^a	甜味
1	α-蒎烯	11.102	—	1 125	—	0.07 ± 0.03 ^a	0.05 ± 0.02 ^a	—	—	—	松木香气
2	D-柠檬烯	17.013	—	1 236	0.31 ± 0.06 ^c	0.19 ± 0.03 ^c	0.21 ± 0.03 ^c	1.43 ± 0.19 ^a	—	1.02 ± 0.17 ^b	柠檬味
3	(Z)-1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-亚基)环己-1-烯	37.873	1 531	1 595	—	—	—	—	—	1.17 ± 0.10a	愉悦香气
4	(Z)-β-法尼烯	41.408	1 685	1 685	—	—	—	—	1.39 ± 0.19 ^a	0.61 ± 0.06 ^b	无明显气味
5	(Z,E)-α-法尼烯	42.765	—	1 720	0.13 ± 0.02 ^c	0.34 ± 0.04 ^c	0.19 ± 0.02 ^c	0.64 ± 0.07 ^c	61.05 ± 2.46 ^a	27.28 ± 2.66 ^b	果香
6	(Z,Z)-α-法尼烯	43.341	1 770	1 734	0.10 ± 0.03 ^c	0.45 ± 0.09 ^c	—	0.73 ± 0.10 ^c	917.45 ± 40.61 ^a	523.79 ± 25.14 ^b	花香
1	2-辛酮	13.727	1 194	1 177	—	—	—	—	—	47.58 ± 3.18 ^a	花香、果香
2	1-辛烯-3-酮	13.742	1 141	1 177	0.50 ± 0.15 ^d	0.81 ± 0.11 ^c	0.78 ± 0.13 ^{cd}	1.38 ± 0.17 ^b	1.37 ± 0.08 ^b	2.09 ± 0.13 ^a	蘑菇味
3	6-甲基-5-庚烯-2-酮	14.205	942	920	0.74 ± 0.03 ^e	2.19 ± 0.33 ^d	—	17.34 ± 0.44 ^b	34.72 ± 0.37 ^a	11.91 ± 0.43 ^c	柑橘味
4	3-辛烯-2-酮	17.609	1 046	1 046	—	—	0.24 ± 0.03 ^a	—	—	—	愉悦气味
5	2-壬酮	21.174	1 350	1 307	—	0.39 ± 0.03 ^b	0.45 ± 0.04 ^b	2.75 ± 0.95 ^a	—	3.56 ± 0.36 ^a	果味、花香
6	3-十二烷酮	21.697	1 368	1 315	—	0.44 ± 0.02 ^a	0.26 ± 0.02 ^b	—	—	—	果香
7	异佛尔酮	22.892	1 388	1 335	—	0.42 ± 0.07b	0.13 ± 0.03b	—	—	6.65 ± 1.48a	薄荷味
8	2-癸酮	28.133	1 476	1 420	—	—	—	—	2.49 ± 0.48 ^a	—	脂肪香气
1	4,7-二甲基十一烷	21.887	1 212	1 185	—	0.10 ± 0.02 ^a	—	—	—	—	—
2	十三烷	35.105	1 300	1 282	0.18 ± 0.05 ^c	0.08 ± 0.03 ^c	0.13 ± 0.01 ^c	0.95 ± 0.11 ^b	—	1.39 ± 0.12 ^a	—
3	十四烷	39.575	1 400	1 454	0.37 ± 0.06 ^c	0.13 ± 0.00 ^c	—	5.31 ± 1.28 ^a	2.35 ± 0.37 ^b	—	无明显香气
4	2,6,10-三甲基十三烷	41.76	1 564	1 602	—	—	0.03 ± 0.01 ^b	—	—	0.99 ± 0.09 ^a	—
5	十六烷	46.399	1 600	1 602	0.81 ± 0.06 ^c	0.07 ± 0.01 ^c	0.36 ± 0.07 ^c	17.64 ± 0.62 ^a	12.50 ± 0.20 ^b	18.58 ± 1.15 ^a	石蜡气味
总计					196.71 ± 15.87 ^d	103.94 ± 10.06 ^d	126.22 ± 1.71 ^d	1 808.25 ± 113.76 ^c	2 465.73 ± 46.92 ^a	2 198.97 ± 47.90 ^b	

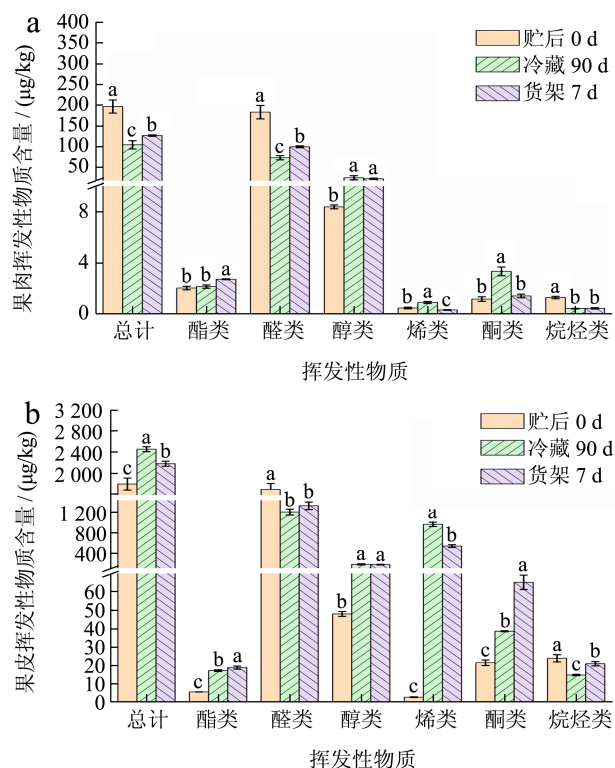


图4 黄冠梨果肉和果皮的挥发性物质成分含量

Fig.4 Volatile compound content of 'Huangguan' pear in flesh and peel

注: a 为果肉; b 为果皮。

醛类物质具有类似青草的香气,同贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 的黄冠梨果肉和果皮的醛类物质含量分别由 183.10 和 1 706.45 $\mu\text{g/kg}$ 降至 72.59 和 1 217.80 $\mu\text{g/kg}$,其中己醛、2-己烯醛和壬醛等物质的含量下降较明显,饱和与不饱和挥发性 C 6 醛通常具有“新鲜青草”的气味,郑欣欣等^[25]同样发现黄冠梨在贮藏期间醛类物质下降。酯类物质是梨果实中主要的香气化合物,大多具有类似于成熟水果的香气。同贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 的黄冠梨果皮的酯类物质总量由 5.54 $\mu\text{g/kg}$ 升至 17.23 $\mu\text{g/kg}$;之后,货架 7 d 黄冠梨果肉的酯类物质总量进一步由 2.20 $\mu\text{g/kg}$ 升至 2.77 $\mu\text{g/kg}$ 、果皮由 17.23 $\mu\text{g/kg}$ 升至 18.84 $\mu\text{g/kg}$,其中,己酸乙酯、乙酸己酯和辛酸甲酯等酯类物质含量上升较明显,它们都具有令人愉悦的果味,Liu 等^[11]认为乙酸己酯可能是梨果实具有梨味的主要香气物质。醇类化合物种类繁多,能呈现出青草和花果等香气^[25],同贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨果肉和果皮中醇类物质含量均显著上升,其中,2-乙基-1-己醇和芳樟醇含量上升较明显,其具有果香味^[26]。烯类物质作为梨果实

中常见的香气化合物,同贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 的黄冠梨果肉和果皮中烯类物质的总量分别由 0.54 和 2.80 $\mu\text{g/kg}$ 升至 1.04 和 979.89 $\mu\text{g/kg}$,上升显著的主要化合物为 (Z,Z)- α -法尼烯和 (Z,E)- α -法尼烯,其具有果香和花香的气味,郑欣欣等^[25]发现黄冠梨在冷藏过程中烯类物质含量上升;同冷藏 90 d 相比,货架期 7 d 的黄冠梨果肉和果皮中烯类物质总量略有下降,其中 (Z,Z)- α -法尼烯和 (Z,E)- α -法尼烯含量下降较为明显。与醛类、酯类、醇类和烯类物质相比,酮类和烷烃类化合物总量较少。同贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 的黄冠梨果肉和果皮中酮类物质显著上升,主要上升的物质为 6-甲基-5-庚烯-2-酮,其具有青草气味^[26];同冷藏 90 d 相比,货架 7 d 的黄冠梨果肉中酮类物质略有下降,6-甲基-5-庚烯-2-酮也是造成其总量下降的主要酮类物质,而货架 7 d 的黄冠梨果皮中酮类物质略有上升,主要物质为 2-辛酮。烷烃类化合物一般无明显香气。

2.6 感官评价

本研究主要运用定量描述分析法^[27],以确定黄冠梨果实不同贮藏期感官特征的差异。黄冠梨的感官评价结果如图 5 所示,随着贮藏时间的变化,黄冠梨的外观、果肉颜色、口感(酥脆度、硬度和多汁度)、酸度和湿度感官特征呈下降趋势,甜度和梨味感官特征呈上升趋势。与贮后 0 d 相比,冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨外观强度下降的主要原因可能与其冷藏期间果面出现少量褐斑有关。同时,黄冠梨的酥脆度、硬度和多汁度强度下降,这可能是因为梨果实在贮藏期间内部结构和化学成分发生了变化,从而使果实的结构和弹性相较于贮后 0 d 略微下降^[28];果实的酸度通常由梨果实中的有机酸含量决定,感官评价中酸度下降与前述所测总酸和主要有机酸的含量下降有关;果实的糖度一般与梨果实中的糖类化合物有关,感官评价中甜度上升,但是前述结果中糖类化合物的总量在冷藏 90 d 和货架 7 d 中却无明显变化,这可能是因为梨果实在贮藏的过程中酸度下降,从而影响了评价员对甜度的感知,即酸度对甜度具有味觉的混合抑制作用^[8],甜酸味觉的拮抗效应^[29]往往会导致感官评价中甜度得分升高;果实的梨味与梨果实中挥发性物质的种类和含量有关,感官评价结果中发现,梨果实在冷藏 90 d 和货架 7 d 梨味上升,本研究前述挥发性物质含量的结果中也发现冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨果皮的挥发性物质总量增加。

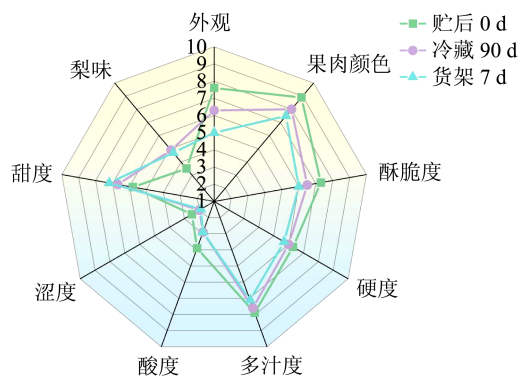


图 5 黄冠梨感官评价雷达图

Fig.5 Radar chart of quantitative description analysis for ‘Huangguan’ pear used by sensory evaluation

2.7 电子舌和电子鼻分析

智能感官评价通过收集由视觉、嗅觉、味觉、触觉和听觉等感官感知到的数据，利用科学的分析方法和智能算法，对产品进行定性、定量的检验与分析^[6]。其中，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^[7]。本研究通过识别不同传感器对不同样本的响应强度，建立了黄冠梨样品的滋味雷达图，如图 6 所示。黄冠梨中共检测到甜味、酸味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富度和咸味 9 种滋味，同贮后 0 d 相比，冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨的甜味强度值上升，酸味、苦味和涩味强度值略有下降。人工感官评价结果同样发现冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨的甜度上升，酸度和涩味下降，二者结果相符。同时，同贮后 0 d 相比，冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨的鲜味和丰富度强度值略有下降，咸味强度值略有上升，其他味觉强度值无明显变化。

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^[17]。由电子鼻的 PCA 得分分析图（图 7a）可知 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 95.81% 和 2.67%，总贡献率为 98.48%，说明三个贮藏时间香气特征相互独立，整体区分度较好。进一步可以发现，冷藏 90 d 与货架 7 d 的整体香气特征接近，与贮后 0 d 的香气特征具有显著差异。由电子鼻的 PCA 载荷分析图（图 7b）可知，W1W 对于区分不同贮藏期黄冠梨整体香气特征贡献较大。此外，在人工感官评价中我们发现，冷藏 90 d 和货架 7 d 的黄冠梨梨味变化不显著，但均明显高于贮后 0 d 的梨味，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相符。

相较于人工感官评价，包括电子鼻和电子舌在内的智能感官不依赖人工评价员的直接感知，制备样品简洁，能够更加客观的对食品的感官特征进行表征，因此电子鼻和电子舌技术可广泛应用于水果、乳制品、果汁等食品的感官评价^[30]。本文电子鼻和电子舌的结果与人工感官评价一致，再次表明智能感官的可靠性，可见智能感官评价在一定程度上可以取代人工感官评价，从而快速、准确、客观的表征的食品感官特征。

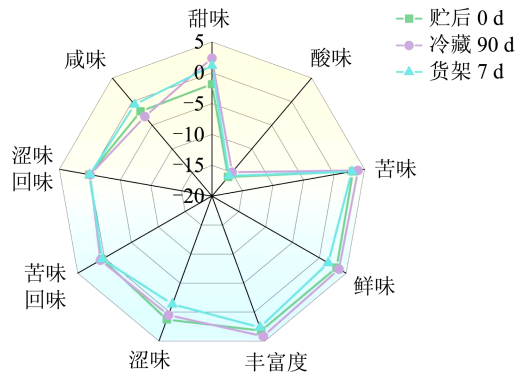


图 6 黄冠梨的电子舌滋味分析雷达图

Fig.6 Radar chart of taste analysis for ‘Huangguan’ pear determined by electronic tongue

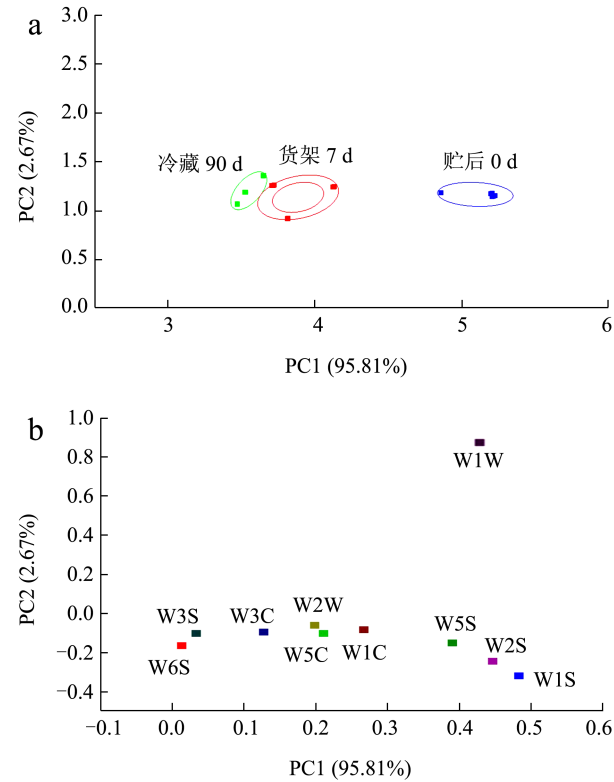


图 7 黄冠梨挥发性气体的电子鼻分析结果

Fig.7 The overall aroma analysis of ‘Huangguan’ pear determined by electronic nose

注：(a) PCA 得分图；(b) PCA 载荷分析图。

2.8 黄冠梨感官特征与理化性质之间的关系

本研究测定了黄冠梨的理化性质和感官特征,其中,理化性质包括非挥发性指标(基础指标、糖、有机酸、总酚和总黄酮含量)和挥发性指标(香气化合物),感官特征包括黄冠梨的外观、果肉颜色、酥脆度、硬度、多汁度、甜度、酸度、涩度和梨味。为了确定黄冠梨的感官特征和相应理化性质之间的关系,本研究通过偏最小二乘回归(PLSR)方法,建立了黄冠梨多自变量 X (理化性质)与多因变量 Y (感官特征)之间的回归模型^[31]。PLSR分析首先揭示了黄冠梨非挥发性指标(X 变量; $n=19$)与除梨味之外的感官特征(Y 变量; $n=8$)之间的关系, X 变量($R^2X=0.616$)解释了 Y 变量($R^2Y=0.582$)的变化(图8a)。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黄冠梨的标志物,VIP值大于1的指标如图8b所示。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。由回归模型可知,贮后0 d与冷藏90 d和货架7 d黄冠梨的感官特征和非挥发性指标明显不同,主要表现为外观、酥脆度、酸度和甜度等感官特征的不同,这与其 a^* 值、硬度、柠檬酸、苹果酸、奎宁酸、葡萄糖和山梨醇等指标密切相关。相较于冷藏90 d和货架7 d的黄冠梨,贮后0 d的黄冠梨 a^* 值更小,表明其具有更好的外观特征;硬度值更高表明其酥脆度更高;柠檬酸、苹果酸和奎宁酸含量更高,表明其酸度强度值更高。货架7 d的黄冠梨具有更高的葡萄糖含量,表明其具有更高的甜度。

同时,PLSR也揭示了黄冠梨果皮的挥发性指标(X 变量; $n=48$)与感官特征梨味(Y 变量; $n=1$)之间的关系, X 变量($R^2X=0.971$)解释了 Y 变量($R^2Y=0.724$)的变化(图10a)。其中VIP大于1的挥发性物质如图10b所示。挥发性指标与梨味感官特征的PLSR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,表明该模型也具有较好的拟合度和可预测性。与果肉中挥发性物质与梨味感官特征的回归模型相似,贮后0 d与冷藏90 d和货架7 d黄冠梨的感官特征和果皮挥发性化合物明显不同。贮后0 d的黄冠梨与己醛(青草气味)、(Z)-3-

烯-1-醇-乙酸酯(青草气味)、(E,E)-2,4-庚二烯醛(青草香气)、壬醛(橙玫瑰香气)、1-己醇(草木气味)、芳樟醇(绿茶香气)、 α -松油醇(丁香香气)、D-柠檬烯(柠檬味)和(E)-2-己烯醛(青草香气)等物质有关;冷藏90 d和货架7 d的黄冠梨具有较高的梨味,这与辛酸甲酯(果味、橙子气味)、(E,Z)-2,4-癸二烯酸乙酯(果味)、癸醛(柑橘味)、1-辛烯-3-醇(玫瑰气味)、2-癸烯-1-醇(橙玫瑰气味)、(Z,Z)- α -法尼烯(花香)、2-乙基-1-己醇(果香)、2-乙基-1-癸醇(甜味)、(Z,E)- α -法尼烯(果香)、乙酸己酯(果味)和辛醇(橙味)等物质密切相关。因此,我们在果皮的挥发性物质中同样发现相较于贮后0 d,冷藏90 d和货架7 d黄冠梨具有水果香气的酯类、醇类和烯类物质略有升高,具有青草气味的醛类物质下降。由此可见,冷藏90 d和货架7 d黄冠梨的梨味感官强度增加是由黄冠梨果皮和果肉中挥发性物质含量的共同变化引起的。

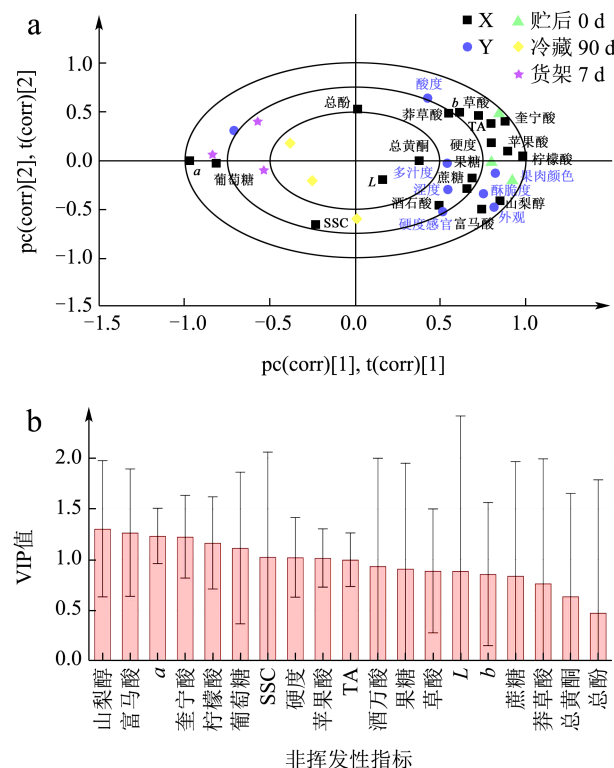
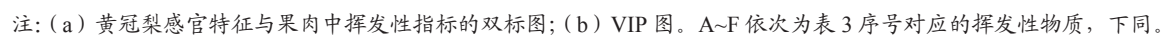


图8 黄冠梨感官特征与非挥发性指标关系的PLS回归图

Fig.8 PLS regression plot showing relationships between sensory attributes and non-volatile indicators of 'Huangguan' pear

注:(a)黄冠梨与非挥发性指标的双标图;(b)VIP图。



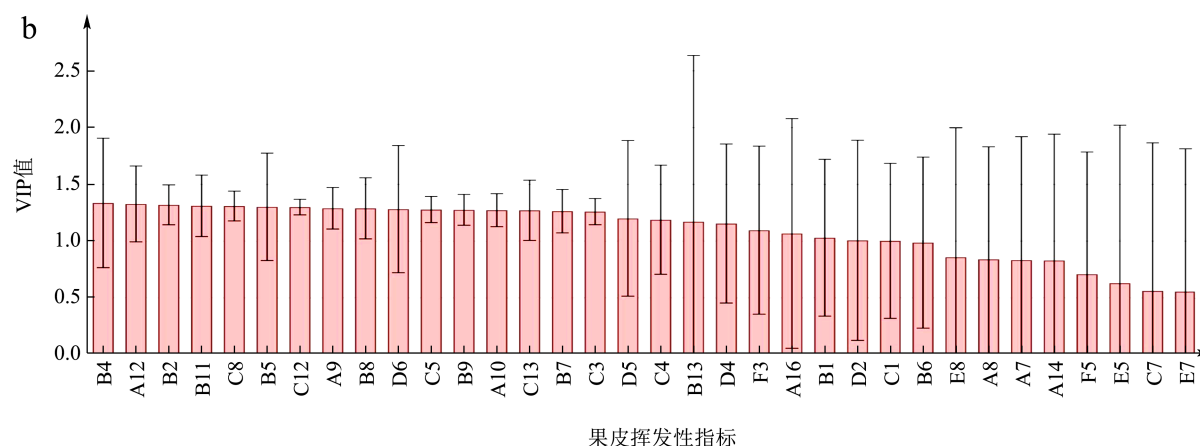


图 10 黄冠梨感官特征与果皮中挥发性指标关系的 PLS 回归图

Fig.10 PLS regression plot showing relationships between sensory attributes and volatiles of 'Huangguan' pear peel

注: (a) 黄冠梨感官特征与果肉中挥发性指标的双标图; (b) VIP 图。

3 结论

本研究通过风味品质分析和感官评价并结合偏最小二乘回归 (PLSR) 的方法, 研究了影响黄冠梨贮藏期间感官特征变化的风味化合物。黄冠梨果实通过 90 d 的冷藏和 7 d 的货架贮藏, 果肉中的葡萄糖含量由 14.73 mg/g 升至 18.29 mg/g, 果肉中的总酸含量由 4.07 mg/g 降至 2.43 mg/g, 苹果酸、柠檬酸和奎宁酸的含量分别由 1.98、1.02、0.82 mg/g 降至 1.38、0.64、0.26 mg/g, 果皮和果肉中的酯类和醇类等物质增多、醛类物质含量减少。感官评价结果表明, 相较于贮后 0 d, 冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨的甜度和梨味感官特征上升, 外观、酸味和硬度等主要感官特征下降。人工感官评价结果与黄冠梨理化性质的 PLSR 分析表明, 苹果酸和柠檬酸、葡萄糖和 SSC、果皮 a^* 值、硬度分别与黄冠梨贮藏期间的酸度、甜度、外观和酥脆度等感官特征相关; (E,E)-2,4-庚二烯醛、壬醛、D-柠檬烯、(E,Z)-2,4-癸二烯酸乙酯、2-乙基-1-癸醇、(E)-2-壬烯醛、庚醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-辛烯醛、乙酸己酯、己醛、芳樟醇、(Z)-3-己烯-1-醇-乙酸酯、(Z,Z)- α -法尼烯、2-乙基-1-己醇、(E)-2-己烯醛、 α -松油醇、2-壬酮、癸醛、辛酸甲酯、2-癸烯-1-醇、(Z,E)- α -法尼烯、1-己醇和辛醇等物质与黄冠梨的梨味感官特征有关。同时, 电子舌结果发现冷藏 90 d 和货架 7 d 黄冠梨的甜味上升, 酸味和涩味下降; 电子鼻结果表明贮后 0 d 黄冠梨的香气特征与冷藏 90 d 与货架 7 d 的香气特征具有显著差异, 与人工感官评价结果相符。综上, 本研究为揭示影响黄冠梨贮藏期间感官特征变化的风味物质提供科学依据; 同时人工和智能感官评价结果相一致表明智能感官评价在一定程度上可以取代人工感官评价,

从而快速、准确、客观的表征的食品感官特征。

参考文献

- [1] 黄丽,王亮,赵迎丽,等.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.
- [2] 何近刚,冯云霄,程玉豆,等.采前氨基乙氧基乙烯甘氨酸处理对‘黄冠’梨长期冷藏后果实品质和果心褐变的影响[J].食品科学,2024,45(3):159-166.
- [3] 胡哲辉,刘园,王江波,等.3个品种梨香气感官品质与挥发性物质关联分析[J].华中农业大学学报,2022,41(4):217-225.
- [4] VILANOVA M, GENISHEVA Z, MASAA, et al. Correlation between volatile composition and sensory properties in Spanish albarino wines [J]. Microchemical Journal, 2010, 95(2): 240-246.
- [5] CHAUVIN M A, ROSS C F, PITTS M, et al. Relationship between instrumental and sensory determination of apple and pear texture [J]. Journal of Food Quality, 2010, 33(2): 181-198.
- [6] 王玉荣,田龙新,张振东,等.基于智能感官和气相色谱-离子迁移谱分析贮藏年限对酱香型白酒的影响[J].食品与发酵工业, 2024,50(14):305-313.
- [7] 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.
- [8] QIN C, CHEN C, YUAN Q, et al. Biohybrid tongue for evaluation of taste interaction between sweetness and sourness [J]. Analytical Chemistry, 2022, 94(19): 6976-6985.
- [9] KIM K, CHUN I J, SUH J H, et al. Relationships between sensory properties and metabolomic profiles of different apple cultivars [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18(1): 100641-100649.
- [10] ZHOU X, SHAN B, LIU S, et al. Sensory omics combined with mathematical modeling for integrated analysis of retronasal muscat flavor in table grapes [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21(2): 101198-101210.
- [11] LIU Y, XIANG S, ZHANG H, et al. Sensory quality evaluation of Korla Pear from different orchards and analysis of their primary and

- volatile metabolites [J]. *Molecules*, 2020, 25(23): 5567-5580.
- [12] TIAN Y, SUN L J, YANG Y L, 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.
- [13] 杨志国,李彩林,王亮.基于高效液相色谱法分析不同品种马铃薯中可溶性糖含量[J].*食品研究与开发*,2022,43(22):174-181.
- [14] 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):193-202.
- [15] ZHANG X Y, LI Y M, LI Y, et al. Changes of bioactive components and antioxidant capacity of pear ferment in simulated gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1211-1230.
- [16] WANG H C, HU Z Q, WANG Y, et al. Phenolic compounds and the antioxidant activities in litchi pericarp: difference among cultivars [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4): 784-789.
- [17] 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.
- [18] LI X, LI C, SUN J, et al. Dynamic changes of enzymes involved in sugar and organic acid level modification during blueberry fruit maturation [J]. *Food Chemistry*, 2020, 309: 125617-125630.
- [19] 王勇,戴丽媛,费腾,等.高效液相色谱串联蒸发光散射检测器测定梨中单双糖含量的研究[J].*农业与技术*,2019,39(15):14-17.
- [20] KOLNIAK-OSTEK J. Chemical composition and antioxidant capacity of different anatomical parts of pear (*Pyrus communis* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2016, 203(15): 491-497.
- [21] [韩彦肖,王亚茹,王永博,等.套袋对黄冠梨果实糖和酸含量的影响[J].*河北农业科学*,2012,16(1):23-26.
- [22] MERY L, OBANDO ULLOA J.M, MACHUCA A, et al. Effect of calcium and anti-browning agents on total phenols and antioxidant capability of ‘Packham’s Triumph’ pears packed in modified atmosphere [J]. *Acta Horticulturae*, 2018, 1209: 291-300.
- [23] 白雪蓉,李雅玲,郑贺云,等.冷激处理对库尔勒香梨贮藏品质的影响[J].*中国果菜*,2023,43(11):3-9.
- [24] 吕金海,程丹菁.金秋梨贮藏过程中褐变度及多酚含量变化[J].*现代农业科技*,2009,11:21-22.
- [25] 郑欣欣,颜滕滕,陈子雷,等.生长期施用GA4+7对黄冠梨贮藏过程中挥发性有机化合物的变化影响[J].*齐鲁工业大学学报*,2024,38(1):19-29.
- [26] 张文君,王颖,李慧冬,等.不同种间杂交梨果的SPME-GC/MS香气成分分析[J].*食品工业科技*,2020,41(11):251-260,266.
- [27] TAITI C, MARONE E, LANZA M, et al. Nashi or Williams pear fruits? Use of volatile organic compounds, physicochemical parameters, and sensory evaluation to understand the consumer’s preference [J]. *European Food Research and Technology*, 2017, 243(11): 1917-1931.
- [28] 徐凌,张广燕,郝义,等.不同采收期对‘早金酥’梨果实品质和贮藏性的影响[J].*中国果树*,2020,3:58-61.
- [29] MAO Y Z, TIAN S Y, QIN Y M, 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(1): 27-33.
- [30] LU L, HU Z Q, HU X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. *Food Research International*, 2022, 162(PB): 112214-112214.
- [31] XIANG Q, XIA Y X, SONG J H, et al. Characterization of the key nonvolatile metabolites in Cheddar cheese by partial least squares regression (PLSR), reconstitution, and omission [J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134034.