

基于电子感官技术和 GC-MS 分析不同干燥方式对乌梅风味的影响

杨亚焱¹, 吴瑞¹, 王瑞^{1,2}, 宋芊芊¹, 周慧银¹, 王俊斐¹, 欧金梅^{1,3,4*}

(1. 安徽中医药大学药学院, 安徽合肥 230012) (2. 芜湖职业技术学院食品与生物工程学院, 安徽芜湖 241006)

(3. 安徽省中医药科学院中药资源保护与开发研究所, 安徽合肥 230012)

(4. 中药饮片制造新技术安徽省重点实验室, 安徽合肥 230012)

摘要: 为揭示不同干燥方式对乌梅风味物质的影响, 分别以烟熏乌梅 (Smoked *Prunus mume*, SP)、热风干燥 (Hot-air Dried *Prunus mume*, HP) 乌梅及烘干 (Dried *Prunus mume*, DP) 乌梅为研究对象, 采用电子鼻 (Electronic Nose, E-nose)、电子舌 (Electronic Tongue, E-tongue) 和气相色谱-质谱 (Gas Chromatography-mass Spectrometry, GC-MS) 联用技术对其挥发性成分进行分析。电子鼻结果可完全区分不同加工而成的乌梅, 其所在风味上具有相似性。电子舌数据结合主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 发现不同加工方法的乌梅在滋味品质上存在差异, 且酸味作为乌梅滋味的代表。采用 GC-MS 共鉴定出 63 种挥发性成分, 包括醇类、酚类、醛类、酸类、酯类化合物以及烃类等其它类化合物, 且含量各不相同, 其中酯类化合物在烟熏乌梅中水平普遍较高, 其次为热风干燥乌梅, 烘干乌梅。电子鼻结合 GC-MS 数据讨论乌梅主要挥发性成分改变的原因, 总结不同加工方法对乌梅风味的影响。可见, 通过 GC-MS 结合电子鼻、电子舌等电子感官技术, 可以很好地区分不同干燥方式处理的乌梅, 进而为乌梅的加工方式选择及产品加工提供理论参考。

关键词: 乌梅; 加工方法; 电子鼻; 电子舌; 气相色谱-质谱 (GC-MS); 风味

文章编号: 1673-9078(2023)05-252-260

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0414

Effects of Different Drying Methods on the Flavor of *Prunus mume* Analyzed by Electronic Sensory Techniques and GC-MS

YANG Yatian¹, WU Rui¹, WANG Rui^{1,2}, SONG Qianqian¹, ZHOU Huiyin¹, WANG Junfei¹, OU Jinmei^{1,3,4*}

(1.School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China) (2.School of Food and

Bioengineering, Wuhu Vocational and Technical College, Wuhu 241006, China) (3.Institute of Chinese Medicine

Resources Protection and Development, Anhui Academy of Chinese Medicine, Hefei 230012, China) (4.Anhui Provincial

Key Laboratory of New Technology for Manufacturing Chinese Herbal Pieces, Hefei 230012, China)

Abstract: To reveal the effects of different processing methods on the flavor substances of *Prunus mume*, smoked *Prunus mume* (SP), hot-air dried *Prunus mume* (HP) and dried *Prunus mume* (DP) were taken as the research objects. Electronic nose, electronic tongue and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined technology were used to analyze the volatile composition. The results of experiments by electronic nose completely distinguished the flavors of differently processed *Prunus mume* fruits, and their flavors were similar. The electronic tongue data combined with the principal component analysis (PCA) showed that the taste qualities of *Prunus mume* processed by different processing methods differed, with the sourness being the representative taste of *Prunus mume*. A total of 63 volatile components were

引文格式:

杨亚焱,吴瑞,王瑞,等.基于电子感官技术和 GC-MS 分析不同干燥方式对乌梅风味的影响[J].现代食品科技,2023,39(5):252-260.

YANG Yatian, WU Rui, WANG Rui, et al. Effects of different drying methods on the flavor of prunus mume analyzed by electronic sensory techniques and GC-MS [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 252-260.

收稿日期: 2022-04-09

基金项目: 中央本级重大增减支项目子项目 (2060302); 安徽中医药大学校级人才项目 (2021rcyb011); 安徽基础研究项目 (RZ210000757)

作者简介: 杨亚焱 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 中药资源与质量评价, E-mail: 1943067977@qq.com

通讯作者: 欧金梅 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 中药资源与质量评价, E-mail: toojm9319@163.com

identified by GC-MS, including alcohols, phenols, aldehydes, acids, esters and hydrocarbons, and their contents were different. Among them, the content of ester compounds in SP was generally higher in SP, followed by HP and DP. The electronic nose experimental result combined GC-MS data allow the elucidation of the cause responsible for the changes of the main volatile components, and the studies on the influences of different processing methods on the flavor of *Prunus mume*. It can be seen that *Prunus mume* fruits processed by different drying methods can be well distinguished by GC-MS combined with electronic sensory technologies such as electronic nose and electronic tongue. This study provides a theoretical reference for the selection of *Prunus mume* processing method and product processing.

Key words: *Prunus mume*; processing method; electronic nose; electronic tongue; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); flavor

乌梅为蔷薇科植物梅 (*Prunus mume* Sieb. et Zucc) 的干燥近成熟果实, 别名为酸梅、梅实、黑梅等^[1], 有着源远流长的药食历史, 广泛应用于日常饮食与保健之中。乌梅含有丰富的有机酸、糖类、氨基酸及人体所需的多种微量元素等^[2], 常加工成蜜饯、果脯等休闲食品, 并且具有抑菌、抗氧化、促消化等生理功能, 具有很高的营养保健作用^[3]。由于鲜果梅含水量高达 88.6% 左右, 所以对其采后干燥成乌梅是贮藏的必要环节^[4]。乌梅加工方式多样, 除了传统的烟熏、烘干之外, 还有热风干燥^[5]等常用加工技术。这不仅促使果实减失水分以便于运输和贮藏, 更是乌梅保存风味的重要环节^[6-9]。

风味是决定消费者购买意愿最直观的属性之一, 不同的加工方法会对食品的滋味和风味特性等产生明显的影响^[10,11]。与其他食品类似, 乌梅具有独特的感官特征, 包括特殊的色泽、酸度和香气等, 决定着消费者的喜好。近年来, 研究者对中药材及食品等的风味变化情况进行了部分研究, 表明加工方式会影响食品风味的不同。例如, 李书帆等^[12]通过分析乌梅与炮制品的挥发性成分, 发现乌梅的挥发性组分和含量经炮制后变化显著, 且药理作用也各不相同。任二芳等^[13]通过气相色谱-质谱 (GC-MS) 结合电子鼻、电子舌等电子感官技术考察了不同干燥方式对澳洲坚果仁风味的影响, 结果表明电子鼻与电子舌技术可以对不同干燥方式处理的坚果样品进行有效区分, GC-MS 共鉴定出包括烷烃和醛类等 227 种挥发性成分。Yang 等^[14]通过对金针菇风味物质的研究, 表明热处理更能够有效促进新挥发性物质的产生以及特征风味品质的形成。

课题组前期对乌梅中化学成分进行多项研究^[15-17], 但对于不同加工方法影响其风味变化的研究相对较少。近年来, 随着药食同源类商品的规模化、工业化要求逐渐提升, 加工方式可以在增加贮存期的同时改善食品的风味, 所以研究药食同源类商品的精深加工对实现中药资源的高效综合利用起着关键作用。为此, 本研究针对乌梅常见的三种加工方式熏制 (Smoked

Prunus mume, SP)、热风干燥 (Hot-air Dried *Prunus mume*, HP) 和烘干 (Dried *Prunus mume*, DP) 对其风味的影响进行探究。利用电子鼻^[18,19]与气相色谱-质谱联用 (GC-MS)^[20-22]技术分析乌梅在以上三种加工方法下风味物质的变化, 通过 SIMCA14.1 软件分析乌梅的感官特性与特征香气物质之间的相关性, 采用电子舌^[23,24]作为滋味补充, 对不同组乌梅样品进行区分和验证。本研究为乌梅加工方式的选择提供参考, 为乌梅产品的精深加工提供技术理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器

PEN3 电子鼻系统, 德国 Aisense 公司; SA402B 味觉分析系统, 日本 Insent 公司; 7890B-5977A 气相色谱质谱联用仪, 美国 Agilent。

1.2 材料

表 1 乌梅样品信息

Table 1 *Prunus mume* sample information

编号	加工方法	产地	编号	加工方法	产地
S1	熏制	四川	S10	熏制	福建
S2	熏制	四川	S11	熏制	福建
S3	熏制	四川	S12	热风干燥	四川
S4	熏制	四川	S13	热风干燥	四川
S5	熏制	四川	S14	热风干燥	四川
S6	熏制	四川	S15	热风干燥	四川
S7	熏制	福建	S16	烘干	云南
S8	熏制	福建	S17	烘干	云南
S9	熏制	福建	S18	烘干	云南

样品于 2020 年 6 月采集, 经安徽中医药大学欧金梅副教授鉴定为蔷薇科梅 *Prunus mume* Sieb. et Zucc 的近成熟果实。详细信息见表 1。熏制乌梅 S1~S11: 采用松木熏制 2~3 d, 温度保持在 60~80 °C 左右; 热风干燥乌梅 S12~S15: 采用热风干燥烘箱干燥乌梅 2~3 天, 温度保持在 40~60 °C 左右。烘干乌梅 S16~S18:

采用低温食品烘干机干燥乌梅 2~3 d, 温度保持在 60 ℃ 左右; 取净制后的乌梅样品适量, 去核, 干燥粉碎, 过 4 号筛, 备用。

1.3 实验方法

1.3.1 电子鼻技术

1.3.1.1 传感器信号分析

电子鼻的 10 个传感器阵列性能如表 2 所示。电子鼻工作过程中的数据采集由 Airsense 公司开发的电子鼻软件 Winmaster 自动控制, 该软件能对采集到的数据进行分析处理。

表 2 10 根金属氧化物传感器信息

Table 2 Performance description of electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	性能特点
1	W1C	对芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	对氨水、芳香成分灵敏
4	W6S	对氢气有选择性
5	W5C	对烷烃、芳香成分灵敏
6	W1S	对甲烷灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对乙醇灵敏
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃灵敏

1.3.1.2 电子鼻测定方法

室温下, 取乌梅样品 S1~S18 号粉末 20 g, 放入一次性塑料杯, 用保鲜膜进行封闭。在室温下平衡 300 s 并产生挥发性物质, 挥发性物质以 100 mL/min 速率进入电子鼻, 取样时间设为 60 s, 传感器阵列的清洗时间设为 150 s。以采样时间为横坐标, 响应信号值 (G/G_0) 为纵坐标, 得出 10 条不同颜色曲线, 分别代表了 10 个传感器在 100 s 内的响应值变化。

1.3.2 电子舌技术

1.3.2.1 传感信号分析

使用 SA402B 电位式电子舌头分析三种不同加工方法的乌梅口味属性。该电子舌包含 5 个化学传感器, 采集到的味觉信息主要包含五个基本味 (鲜味、咸味、酸味、苦味和涩味) 和三个回味 (鲜味、苦味和涩味)。

1.3.2.2 样品制备

分别精密称取乌梅样品 S1~S18 号 1.5 g 粉末于烧杯中, 加入 50 mL 蒸馏水, 超声 30 min。超声结束, 离心 (4 000 r/min) 10 min, 取 3 mL 上清液, 再加蒸馏水定容至 50 mL, 测定溶液 pH 值为 4.0, 即得。

1.3.2.3 检测条件

首先将正、负极分别放入正、负极清洗液中清洗

90 s, 接着用基准液清洗 120 s、继续用另一基准液溶液清洗 120 s, 传感器回到平衡位置 30 s, 之后开始测试, 时间为 30 s; 然后传感器在两组基准液中分别清洗 3 s, 之后插入新的基准液中测试回味 30 s。共进行 4 次循环, 舍去第一次循环数据, 以后面 3 次数据的平均值作为测试结果。

1.3.3 GC-MS 分析

1.3.3.1 挥发油的制备

三种加工方式下的乌梅样品分别混合均匀, 称取乌梅粉末 25 g, 加水 250 mL, 用水蒸气蒸馏法提取挥发油 5 h。所得挥发油用无水硫酸钠干燥, 并用乙酸乙酯稀释 20 倍, 过 0.22 μm 滤膜, 用于 GC-MS 分析。

1.3.3.2 GC-MS 检测

色谱条件: HP-5 色谱柱 (30 m×250 μm, 0.25 μm); 进样口温度 250 ℃; 进样量 1 μL; 分流比 20:1, 载气 (He) 流速 1.0 mL/min; 程序升温: 40 ℃ 保持 5 min, 以 10 ℃/min 升温至 170 ℃, 保持 2 min, 再以 1 ℃/min 升温至 220 ℃, 保持 2 min。

质谱条件: 电子电离源; 电子能量 70 eV; 离子源温度 200 ℃; 四级杆温度 180 ℃; 传输线温度 250 ℃; 溶剂延迟 4 min; 质量扫描范围 m/z 35~500。

1.4 数据处理

电子鼻数据利用 SPSS 20.0 软件进行分析; 电子舌数据采用 SIMCA 软件将三次测量所得数据取平均值进行三维 PCA 分析, 实现固有的乌梅样本之间的聚类, 并对响应值为正值的四种传感器 (涩味回味、涩味、苦味、酸味) 所对应的样品进行统计分析。GC-MS 检测所得化合物由 NIST 图书馆检索数据系统及相关参考文献定性 (匹配度 > 80%)。选取全部挥发性成分进行 PCA 分析, 以区分不同加工方法的乌梅, 并找出能区分这三种乌梅样品的重要成分。

2 结果与分析

2.1 电子鼻结果分析

2.1.1 不同加工方法乌梅样品响应值分析

为了更直观地反映乌梅不同加工方法的电子鼻响应值, 以响应值数据绘制雷达图, 结果见图 1 所示。熏制、电烘和热风干燥处理后的样品整体出峰情况较为相似, W1W 传感器响应值最大, 其次为 W2W、W5S、W1S 传感器, 其余 6 个传感器响应值均较低。其中熏制处理后的乌梅在多个传感器峰面积明显变大, 表明多种香气物质含量及其整体香气强度升高, 与电烘及热风干燥相比存在差异性。

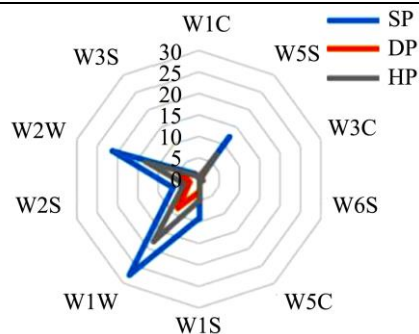


图1 传感器响应值雷达图

Fig.1 Radar chart of sensor response value

2.1.2 不同加工方法乌梅样品区分分析

对所有样品进行主成分分析, 结果如图 2。PC1 和 PC2 贡献率分别为 79.14% 和 16.83%, 累积贡献率为 95.97% (大于 80%), 表明其可以有效反映原始数据的整体信息。熏制后的乌梅样品与电烘、热风干燥处理的乌梅样品分别位于第二主成分的正半轴和负半轴, 表明它们在第二主成分上差异明显。电烘和热风干燥处理的样品区域非常接近, 表明两者之间可能存在一定的相似性。各处理组之间均分散无交叉, 说明各个样品组之间相互独立且能够通过电子鼻进行较好的区分, 表明不同加工方式对乌梅中风味物质影响较大, 可在不同程度上改变乌梅的香气成分。

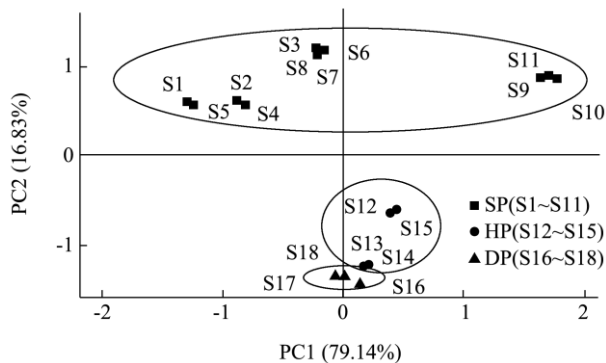


图2 乌梅样品电子鼻数据的主成分分析

Fig.2 PCA of E-nose data for *Prunus mume* samples

2.2 电子舌结果分析

2.2.1 不同加工方法乌梅样品响应值分析

电子舌的原理与电子鼻相似, 能够通过电子传感器检测味觉特征, 模仿人类的味觉^[25]。将响应值为正值的四种传感器(涩味回味、涩味、苦味、酸味)第 30 s 的信号值用于进一步的统计分析, 见图 3。尽管各传感器反应强度不同, 但所有样本对四种主要传感器的变化趋势都相似。各样本的酸味响应值明显高于其他味觉信息, 其次为涩味响应值, 苦味响应值, 涩味回味响应值。其中热风干燥的乌梅样品酸味响应值最高, 其次为烟熏乌梅, 最后为烘干乌梅。课题组前

期研究^[14]表明, 乌梅含有大量的有机酸, 因此有机酸类化学成分是乌梅中酸度滋味的代表。其中枸橼酸在乌梅中含量占比最大, 具有显著的保健效果, 不仅能有效促进体内乳酸分解, 解除疲劳, 改善精神状态, 而且能增进食欲, 保护肝脏和肾脏^[26,27]。

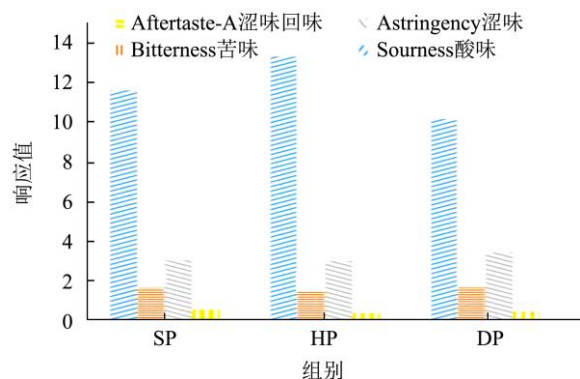


图3 乌梅样品电子舌传感器的特征值

Fig.3 The characteristic values of the electronic tongue sensor of the *Prunus mume*

2.2.2 不同加工方法乌梅样品区分分析

为观察不同加工方法乌梅样品的差异性, 采用 PCA 方法对 18 批乌梅样品进行主成分分析。如图 4 所示, 所有样本数据的分布呈现出明显的分组趋势。PC1 和 PC2 贡献率分别为 77.9% 和 16.8%, 累积贡献率为 94.7% (大于 80%), 表明该模型具有良好的区分程度。这一结果表明, 能够通过电子舌区分三种不同加工方法的乌梅样品。

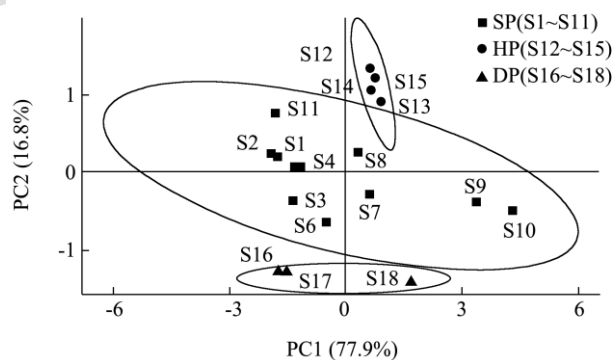


图4 乌梅样品电子舌数据的主成分分析

Fig.4 PCA of E-nose data for *Prunus mume* samples

2.3 GC-MS 结果分析

对三种干燥条件下样品的总离子流色谱进行质谱检索, 定性结果如表 3 所示, 共计检出 63 种化合物。在熏制、热风干燥及电烘处理的乌梅样品中分别检出 50、24、14 种挥发性化合物, 主要包括醇类、酚类、醛类、酸类、酯类物质以及烃类等其它类物质。烟熏乌梅样品中共检测到 50 中挥发性成分, 酸类 5 种, 醇类 5 种, 酚类 5 种, 酯类 11 种, 酮类 3 种, 烷烃类

10 种, 其他类 11 种。烟熏乌梅中含量较高的成分主要有 1,2-苯二甲酸-8-甲基壬基丁酯 (35.61%)、亚油酸 ((7.83%)、亚油酸甲酯 (7.61%)、角鲨烯 (6.23%)。热风干燥乌梅样品中共检测出 24 种挥发性化合物, 酸类 4 种, 醇类 2 种, 酯类 6 种, 酮类 3 种, 烷烃类 3 种, 其他类 6 种。热风干燥乌梅中含量较高的成分主要有棕榈酸 (36.95%)、1,2-苯二甲酸-8-甲基壬基丁酯 (21.46%)、亚油酸甲酯 (4.92%)、9,12-十八碳二烯酸(Z,Z)- (4.24%)。烘干乌梅样品中检测出 14 种挥发性成分, 酸类 1 种, 醇类 1 种, 酯类 7 种, 烷烃类 2 种, 其他类 3 种, 这与前两种加工方式相比其挥发物的数量显著减少, 这可能归因于长期暴露在高温空气中导致风味前体的损失。烘干乌梅中含量较高的成分主要有 1,2-苯二甲酸-8-甲基壬基丁酯 (7.82%)、9-十八碳烯酸(Z)-甲酯 (5.69%)。综上, 烟熏乌梅保存酯类物质效果最佳, 其次为热风干燥乌梅, 烘干乌梅; 热风干燥乌梅中酸类含量最多, 其次为烟熏乌梅, 烘

干乌梅。

乌梅中的挥发性物质主要是由一些果胶酶在加热过程中发生的一系列生化反应产生^[28]。其中, 乌梅中香气成分含量较高的物质是酯类化合物, 三种加工方法的乌梅样品共检出有 15 种, 此类物质主要由醇类和酸类物质之间发生酯化反应生成, 具有水果清香, 因此酯类物质在乌梅风味中发挥着重要的作用。乌梅香气成分的另一类含量较高的物质是酸类化合物。研究^[29,30]表明乌梅果胶酶具有很高的酯酶活性, 能够生成大量短链脂肪酸。因此, 脂肪酸作为乌梅中含量丰富的风味物质, 对于乌梅整体风味的形成起着关键作用。此外, 研究认为醇类物质的前体物质^[31]是多不饱和脂肪酸, 他们是酵母菌分解糖代谢以及氨基酸脱氨的代谢产物、stretcher 降解产物继续还原生成。烃类化合物作为乌梅加热过程中自动氧化的次级产物, 伴随着醇、酮、醛类物质的产生挥发出来较淡的水果香味。

表 3 乌梅样品中挥发性成分的 GC-MS 鉴定结果

Table 3 GC-MS identification results of volatile components in ebony samples

编号	分类	化合物中文名称	保留时间/min	相对含量/%			
				熏制	热风干燥	烘干	
1	酸类	月桂酸	19.32	0.54±0.19	1.34±0.11	-	
2		十四烷酸-1-13C	23.49	0.66±0.07	0.77±0.13	-	
3		棕榈酸	30.87	0.80±0.03	36.95±3.29	-	
4		-	32.76	0.29±0.08	-	-	
5		亚油酸	39.33	7.83±2.03	-	-	
6		9,12-十八碳二烯酸 (Z,Z)-	39.42	-	4.24±0.93	1.03±0.25	
7	醇类	双环[2.2.1]庚-5-烯-2-甲醇	7.79	0.16±0.04	-	-	
8		-	13.55	0.20±0.03	-	-	
9		-	24.95	0.34±0.05	-	-	
10		6-甲基-2-(4-甲基-3-环己烯-1-基)-5-庚烯-2-醇	25.96	-	0.14±0.03	-	
11		13-十七炔-1-醇	42.46	0.52±0.13	-	-	
12		-	43.27	1.09±0.08	0.94±0.03	-	
13		1-七三十醇	63.18	-	-	1.27±0.12	
14		酚类	2-甲氧基-6-(2-丙烯-1-基)-苯酚	16.73	0.24±0.06	-	-
15			4-丙基愈创木酚	17.89	0.34±0.03	-	-
16			2,4-双(1,1-二甲基乙基)-苯酚	18.62	0.58±0.14	-	-
17			4,4'-(1-苯亚乙基)联苯酚	24.60	0.51±0.11	-	-
18			2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基苯酚)	56.76	1.12±0.24	-	-
19		酯类	12,15-十八碳二烯酸甲酯	19.44	0.12±0.06	-	-
20	古伦宾		26.71	0.34±0.04	-	-	
21	1,2-苯二甲酸丁辛酯		26.97	0.90±0.06	-	-	
22	水杨酸三甲环己酯		27.67	0.73±0.07	0.85±0.04	-	
23	棕榈酸甲酯		29.13	4.02±0.11	3.72±0.15	2.17±0.09	
24	1,2-苯二甲酸-8-甲基壬基丁酯		30.72	35.61±2.73	21.46±2.89	7.82±0.43	

续表 3

编号	分类	化合物中文名称	保留时间/min	相对含量/%		
				熏制	热风干燥	烘干
25		十六烷酸乙酯	32.14	0.76±0.15	0.31±0.03	0.94±0.11
26		9-十八碳烯酸, (2-苯基-1,3-二氧戊环-4-基) 甲酯, 顺式-	36.02	0.36±0.07	-	-
27		亚油酸甲酯	37.12	7.06±0.46	4.92±0.03	-
28		9-十八碳烯酸 (Z) -甲酯	37.62	-	-	5.69±0.22
29		亚油酸乙酯	40.93	1.26±0.08	-	-
30		[1,1'-双环丙基]-2-辛酸, 2'-己基-, 甲酯	49.11	-	0.65±0.03	0.82±0.02
31		-	51.20	0.69±0.06	-	-
32		-	57.04	-	-	0.47±0.14
33		6,9,12,15-二十二碳四烯酸甲酯	61.15	-	-	0.67±0.09
34		-	24.69	-	0.30±0.09	-
35		6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	26.09	0.32±0.11	0.96±0.03	-
36	酮类	二苄基甲酮	28.45	0.22±0.02	-	-
37		-	28.87	-	0.40±0.06	-
38		1,4-雄烯二酮	30.02	0.27±0.003	-	-
39		对二甲苯	7.82	-	-	1.20±0.13
40		D-柠檬烯	11.41	-	-	0.18±0.09
41		-	22.41	-	0.16±0.08	-
42		蒽	24.32	2.21±0.17	-	-
43		1-甲基-菲	27.93	0.51±0.14	-	-
44		2-甲基-菲	28.14	0.78±0.08	-	-
45	烷烃类	4-甲基-菲	28.85	0.69±0.09	-	-
46		1,3-二苯基-3-甲基环丙烯	33.64	0.53±0.11	-	-
47		荧蒽	34.68	2.95±0.23	-	-
48		1-甲基-7-(1-甲基乙基)-菲	43.02	1.21±0.14	-	-
49		四十四烷	47.51	2.40±0.07	3.61±0.18	-
50		十七烷	49.57	2.19±0.16	3.74±0.21	-
51		角鲨烯	68.59	6.23±1.23	-	-
52		十二甲基-环六硅氧烷	16.07	0.32±0.08	0.19±0.06	10.98±1.96
53		α -四氢萘, 2-氨基-5,6-二甲氧基	18.09	0.23±0.09	-	-
54		十四甲基环庚硅氧烷	18.34	0.74±0.05	0.66±0.11	-
55		2,3,5-三甲氧基苯丙胺	18.89	0.18±0.02	-	-
56		十六甲基-环八硅氧烷	21.21	0.46±0.14	0.62±0.07	4.20±0.26
57	其他类	2,3-二氮杂菲	23.25	0.29±0.09	-	-
58		-	25.55	1.75±0.12	0.36±0.02	3.39±0.16
59		1-单油酰基甘油三甲基甲硅烷基醚	31.76	0.52±0.03	0.52±0.05	-
60		-	33.86	0.27±0.06	-	-
61		2-肉豆蔻酰泛硫胺	34.71	-	0.25±0.09	-
62		全反式-N-(4-羟苯基)维甲酸	35.85	0.24±0.07	-	-
63		1H-菲并[9,10-c]吡唑	38.56	1.20±0.11	-	-

注: “-”表示此化合物未检出。

在所鉴定出来的化合物中,最值得注意的5个酚类物质。本文鉴定出的2-甲氧基-6-(2-丙烯-1-基)-苯酚、4-丙基愈创木酚、2,4-双(1,1-二甲ethyl基)-苯酚、4,4'-(1-苯乙基)联苯酚和2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基苯酚)共同构成了乌梅的主体香气-烟熏香气,这些酚类物质来自于木材燃烧时木质素的降解,是烟熏食品的主体风味物质^[32]。这点与苗志伟等^[28]对乌梅中酚类化合物挥发性成分的分析结果有所不同,可能是与使用的乌梅品牌、样品前处理以及分析条件等因素有关。食品熏制是最古老的保鲜加工方法之一,因为它具有脱水特性,并且还具有抗菌和抗氧化特性的有机化合物。烟熏还被用来改善食品的味道、颜色和香味^[33-35]。而其他两种干燥方式未定性出酚类化合物,故酚类物质被认为是鉴别为烟熏乌梅的特有成分。可以看出与热风干燥和电烘制相比,乌梅经过烟熏这种方式处理后其风味化合物的含量均显著升高。其中乌梅在电烘处理下挥发性组分均损失严重,受影响程度很大。

2.4 电子鼻与 GC-MS 相关性分析

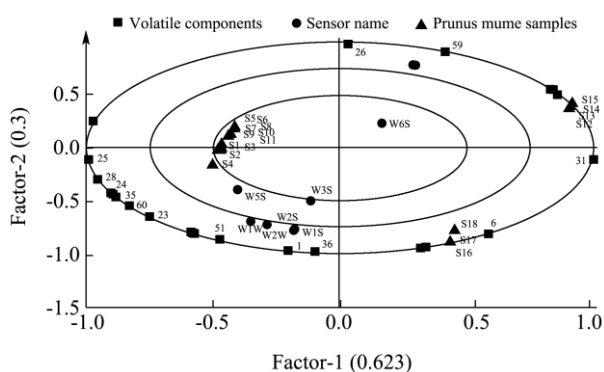


图5 挥发性成分与电子鼻传感器响应之间相关性分析

Fig.5 Biplot for the correlation between volatile components and the E-nose sensor responses

注: 1~63 为挥发性化合物; S1~S18 为乌梅样品; 圆形为传感器名称; 数字与表 3 中的挥发性成分相同。

为了探索电子鼻反应的物质基础,有必要研究电子鼻与 GC-MS 结果之间的相关性。基于 SIMCA 软件,将电子鼻 10 个传感器的最大响应值及表 3 定性出的挥发性化合物作为自变量,样品作为因变量导入进行 Biplot 分析,结果如图 5 所示。样品聚类后与化合物的距离越短,说明该类样品中此类化合物的含量越高,即两者的相关性越高;且化合物与传感器特征值的距离越短,说明该化合物与传感器响应的风味相关性越高。在图 6 中,绝大部分化合物分布在坐标系统的第三象限,与传感器 W1W、W2W 及 W5S 最为接近且靠近于烟熏的乌梅样品,其次靠近于热风干

燥的乌梅样品。由此表明这三个传感器与这些化合物呈高度正相关,即传感器 W1W、W2W 及 W5S 响应值的变化受 1,2-苯二甲酸-8-甲基壬基丁酯、亚油酸甲酯及棕榈酸甲酯等酯类化合物影响较大;而少数其他类化合物分布在坐标系统的第一象限,与传感器 W1C、W3C 及 W5C 较为接近且靠近烘干乌梅样品。GC-MS 检测结果与电子鼻的雷达图结果相吻合,这一结果也证明了烟熏后的乌梅保存酯的效果更好,其风味更为丰富,其次为热风干燥所得乌梅,最后为烘干的乌梅样品。

3 结论

乌梅自古以来就有较高的食用价值和医药疗效,加工过程会对乌梅所含有的挥发性组成成分产生影响,使其风味发生改变,从而适用于不同的食品产业以及人群。本文以乌梅为研究对象,利用 GC-MS 与电子感官技术对烟熏、热风干燥和电烘三种加工方式的风味物质进行检测分析,共检测出挥发性物质 63 种。烟熏处理后的乌梅中酚类物质含量增加,酸味得到减弱;热风干燥和电烘后原有风味明显减弱,其中电烘的干燥方式对乌梅风味化合物的损失最大。电子鼻中 W1W、W2W 及 W5S 响应值的变化受 1,2-Benzenedicarboxylic Acid, Butyl 8-Methylnonyl Ester、Methyl Linoleate 及 Methyl Palmitate 等酯类化合物影响较大,因此酯类化合物是乌梅中特征香气物质之一,而酚类化合物能够贡献丰富的焦香味等,是烟熏乌梅的特征香气。松木熏制作为使乌梅风味最为丰富的加工方式,还存在木材的不完全燃烧并在乌梅表面沉积致癌化合物的问题。目前,采用烟熏液体作为调味添加剂被广泛运用于肉类、坚果等各种食品,更加环保的同时赋予食物丰富的风味。

综上所述,电子鼻可以感知不同加工方式的乌梅在香气上的差异,而 GC-MS 结果可在一定程度上解释该差异来源,电子舌则作为滋味补充,三者从整体上相互印证、相互补充,为分析不同加工方式乌梅的风味物质提供了理论依据和技术参考。由于不同加工方式导致风味物质的种类差异,相信通过进一步的研究可以使多种风味被充分利用,从而扩大乌梅的应用价值,带来更好的经济效益。

参考文献

- [1] 丁超,叶富根,李沛生.同时蒸馏萃取-气质联用分析乌梅中的挥发性成分[J].食品工业科技,2012,33(6):113-116,127.
- [2] 姜翠翠,叶新福,林炎娟,等.福建省 4 个果梅主栽品种果实营养品质、香气成分分析与评价[J].食品科学,2021,42(10):

- 276-283.
- [3] 马嫻,罗鸣,殷晓翠,等.果梅的化学成分及应用研究进展[J].食品工业科技,2018,39(4):337-341,352.
- [4] 毕金峰,陈芹芹,刘璇,等.国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J].中国食品学报,2013,13(3):8-14.
- [5] 陈林伟,秦昆明,朱艳汇,等.中药材产地加工的研究现状及展望[J].中国中药杂志,2015,40(4):602-606.
- [6] Pellicer J A, Fortea M, Trabal J, et al. Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze-drying and fluid Bed [J]. Powder Technology, 2019, 347: 179-185.
- [7] Duan X, Liu W C, Ren G Y, et al. Effects of different drying methods on the physical characteristics and flavor of dried hawthorns (*Crataegus* spp.) [J]. Drying Technology, 2017, 35(11): 1412-1421.
- [8] Yuan L, Liang X J, Pan X, et al. Effects of high hydrostatic pressure combined with vacuum-freeze drying on the aroma-active compounds in blended pumpkin, mango, and jujube juice [J]. Foods, 2021, 10(12): 3151-3156.
- [9] Pandiselvam R, Tak Y, Olum E, et al. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food [J]. Journal of Texture Stud, 2021, 7(10): 1-26.
- [10] Hou Z S, Wei Y Y, Sun L B, et al. Effects of drying temperature on umami taste and aroma profiles of mushrooms (*Suillus granulatus*) [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(5): 1983-1998.
- [11] Nam D G, Kim M, Choe J S, et al. Effects of high-pressure, hydrothermal, and enzyme-assisted treatment on the taste and flavor profile of water-soluble ginger (*Zingiber officinale*) extract [J]. Foods, 2022, 11(4): 508.
- [12] 李书帆,刘毅,江汉美,等.HS-SPME-GC-MS 法分析乌梅与炮制品中挥发性成分[J].湖北农业科学,2021,60(9):113-116.
- [13] 任二芳,刘功德,艾静汶,等.基于电子感官技术结合 GC-MS 分析不同干燥方式下澳洲坚果风味的差异[J].现代食品科技,2021,37(11):304-316,84.
- [14] Yang W J, Yu J, Pei F, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 860-866.
- [15] 李昕,王瑞,李肖莉,等.不同加工方法乌梅 UPLC 特征图谱及模式识别研究[J].中国中医药信息杂志,2020,27(11):76-81.
- [16] 欧金梅,王瑞,程庆兵,等.ICP-MS 法测定不同产地乌梅无机元素含量[J].中草药,2020,51(2):482-489.
- [17] Ou J M, Wang R, Li X L, et al. Comparative analysis of free amino acids and nucleosides in different varieties of *Mume fructus* based on simultaneous determination and multivariate statistical analyses [J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2020, 2020: 4767605.
- [18] Makarichian A, Amiri C R, Ahmadi E, et al. Assessment the influence of different drying methods and pre-storage periods on garlic (*Allium sativum* L.) aroma using electronic nose [J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 2: 1-16.
- [19] Fei C H, Ren C C, Wang Y L, et al. Identification of the raw and processed *Crataegi fructus* based on the electronic nose coupled with chemometric methods [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1849.
- [20] Long Q, Li Z, Han B, et al. Discrimination of two cultivars of *alpinia officinarum* hance using an electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry coupled with chemometrics [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(3): 572.
- [21] 王越,王连,王愈.基于 GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 的不同处理方式黑枣的挥发性成分分析[J].食品科学,2022,43(8): 247-254.
- [22] Song J X, Chen Q Q, Bi J F, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods [J]. Food Chemistry, 2020, 331(prepublish): 127201.
- [23] 张玲,丁卫英,韩基明,等.不同品种枣粉的化学成分和电子舌分析[J].食品工业,2020,41(11):169-172.
- [24] Zhu D S, Ren X J, Wei L W, et al. Collaborative analysis on difference of apple fruits flavour using electronic nose and electronic tongue [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260(C): 108879.
- [25] Gyawali R, Feng X, Chen P Y, et al. A review of factors influencing the quality and sensory evaluation techniques applied to Greek yogurt [J]. Journal of Dairy Research, 2022, 89(2): 1-7.
- [26] 张华月,李琦,付晓伶.乌梅化学成分及药理作用研究进展[J].上海中医药杂志,2017,51(S1):296-300.
- [27] 杨亚焱,王瑞,钱程程,等.乌梅化学成分、药理作用研究进展及质量标志物预测[J].中成药,2023,45(5):1583-1588.
- [28] 苗志伟,刘玉平,孙宝国.SDE-GC-MS 分析乌梅中挥发性成分[J].食品科学,2011,32(24):270-273.
- [29] 张超,谭平,王玉霞,等.果胶酶解青梅果醪最佳工艺条件研究[J].食品工业,2015,36(9):117-121.
- [30] Cho H, Kim J, Won Y, et al. Inhibitory effects of pectinase-treated prunus mume fruit concentrate on colorectal

- cancer proliferation and angiogenesis of endothelial cells [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(11): 3284-3295.
- [31] Yang S B, Meng Z P, Fan J, et al. Evaluation of the volatile profiles in pulp of 85 apple cultivars (*Malus domestica*) by HS-SPME combined with GC-MS [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(5): 1-11.
- [32] 赵冰,任琳,陈文华,等.烟熏工艺对熏肉挥发性风味物质的影响[J].*食品科学*,2013,34(6):180-187.
- [33] 宋丽,陈星星,谷风林,等.GC-MS 与电子感官结合对烟熏液风味物质的分析[J].*食品科学*,2020,41(16):193-201.
- [34] 郭园园,娄爱华,沈清武.烟熏液在食品加工中的应用现状与研究进展[J].*食品工业科技*,2020,41(17):339-344,351.
- [35] Zhang L, Chen Q, Liu Q, et al. Effect of different types of smoking materials on the flavor, heterocyclic aromatic amines, and sensory property of smoked chicken drumsticks [J]. *Food Chemistry*, 2022, 367: 130680.