DOI:10.12441/spyswjs.20240822001 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0074-09

L-苹果酸特性及其在橙汁中的应用研究

刘星源[1] 樊 义[2] 鲍佳斌[2] 邢 庆[2] 杨瑞金[1,3] 仝艳军[1,3*]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 安徽华恒生物科技股份有限公司,安徽 合肥 231111; 3. 江南大学江苏省食品安全与质量控制协同创新中心,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】研究*L*-苹果酸的基本特性及其在橙汁中的应用。**【方法】**首先,通过热稳定性、pH稳定性和电子舌滋味品质变化,分析*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的基本特性差异;随后,将这3种酸味剂分别添加至橙汁中,比较其离心沉降率、pH、电导率、粒径、Zeta电位和挥发性风味物质等指标的差异,分析*L*-苹果酸对橙汁稳定性和挥发性风味物质的影响。**【结果】***L*-苹果酸在40~121 ℃、pH 2.0~7.0条件下具有较好的稳定性。*L*-苹果酸与柠檬酸在涩味和涩的回味上差异较大,与*DL*-苹果酸在滋味指标上无显著差异。与等质量浓度的柠檬酸相比,*L*-苹果酸的涩味增加了63.79%,涩的回味降低了68.07%,酸味和苦的回味分别增加了37.41%和26.05%。在橙汁饮料体系中,与柠檬酸相比,添加等质量分数的*L*-苹果酸可提高饮料体系的Zeta电位和稳定性。**【结论】**该研究为*L*-苹果酸的推广应用及提升橙汁产品的滋味品质和稳定性提供了技术支撑。

关键词:*L*-苹果酸;酸味剂;滋味品质;橙汁

Characteristics of *L*-Malic Acid and Its Application in Orange Juice

LIU Xingyuan[1] *FAN Yi*[2] *BAO Jiabin*[2] *XING Qing*[2] *YANG Ruijin*[1,3] *TONG Yanjun*[1,3*]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Anhui Huaheng Biotechnology Co., Ltd., Hefei 231111, China; 3. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: [**Objective**] The basic characteristics of *L*-malic acid and the application of *L*-malic acid in orange juice were studied. [**Method**] The basic characteristic differences of *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid were compared in terms of thermal stability, pH stability, and taste quality changes of electronic tongue. Subsequently, the three sour agent were added into orange juice. The effects of *L*-malic acid on the stability and volatile flavor of orange juice were analyzed based on the differences in centrifugal sedimentation rate, pH, electrical conductivity, particle size, Zeta potential, and volatile components. [**Result**] *L*-Malic acid had good stability in the ranges of 40~121 ℃ and pH 2.0~7.0. *L*-Malic acid differed markedly from citric acid in terms of astringency and the aftertaste of astringency, while it had no significant difference in taste indicators from *DL*-malic acid. Compared with citric acid, *L*-malic acid at the same mass concentration showed an increase of 63.79% in astringency value, a decrease of 68.07% in astringent aftertaste value, and increases of 37.41% and 26.05% in sour and bitter aftertaste values, respectively. Compared with the addition of citric acid, the addition of *L*-malic acid as the same mass concentration effectively increased the Zeta potential and improving the stability of the orange juice beverage system. [**Conclusion**] This study provide technical support for the promotion and application

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31701582)。

通信作者:仝艳军(1986—),女,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事功能性食品的生物制备及营养功能研究。E-mail:tongyanjun@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-08-22 **修回日期:**2024-10-11

of *L*-malic acid in improving the taste quality and stability of orange juice products.

Keywords: *L*-malic acid; sour agent; taste quality; orange juice

酸味剂是一种常见的食品添加剂，不仅能够作为酸度调节剂改善食品风味，还可以起到抑菌、护色和改善食品品质等作用[1-3]。有研究报道了有机酸对桑葚花色苷的护色作用，发现苹果酸的护色效果最佳[4]；且酸味剂可以影响肠道菌群，促进宿主肠道健康[5]。目前食品中常用的酸味剂有苹果酸、柠檬酸、乳酸等。当前市场中的苹果酸多为*DL*-苹果酸，*DL*-苹果酸是左旋体（*L*-苹果酸）和右旋体（*D*-苹果酸）的等量混合物，其中*D*-苹果酸不易被人体代谢，而*L*-苹果酸不仅是一种优良的酸味剂，还具有重要的生理功能[6-7]，可进入三羧酸循环参与能量代谢，缓解疲劳，具有抗氧化活性[8]。在实际应用过程中，多种味觉化合物混合，会对味觉感知产生增强或抑制的作用[9]。如当有机酸达到一定浓度时，可能会抑制甜味剂产生的甜味[10-11]；此外，有机酸对苦味、咸味、鲜味等也会产生不同的影响，如柠檬酸可能会抑制谷氨酸钠的鲜味[12-13]。近年来，随着电子舌和电子鼻等电子感官评价系统的应用，对滋味品质的评价逐渐实现数字化和精准化。

目前，关于苹果酸的相关研究主要集中在*DL*-苹果酸上，对*L*-苹果酸的研究则主要聚焦于葡萄酒中苹果酸-乳酸发酵层面[14]，而将*L*-苹果酸作为食品酸味剂，探究其基本特性及其在饮料体系实际应用中的相关研究鲜有报道[15]。作者对*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的热稳定性、pH稳定性和电子舌滋味品质差异进行研究，并比较其离心沉降率、pH、电导率、粒径、Zeta电位和电子鼻挥发性风味物质差异，探究*L*-苹果酸对橙汁饮料稳定性和挥发性风味物质的影响，旨在为*L*-苹果酸的推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

L-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸：食品级，安徽华恒生物科技股份有限公司；橙汁浓缩浆：湖北多客多食品有限公司；甲醇、乙酸铵、磷酸、乙腈：色谱级，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

全自动高效液相色谱仪（HPLC）：Agilent 1000型，美国安捷伦公司；热重分析仪：TGA2型，瑞士梅特勒托利多公司；紫外-可见分光光度计：UV-5100型，上海元析仪器有限公司；分析天平：FA型，上海越平科学仪器有限公司；快速气相电子鼻：Heracles 2型，法国阿默思公司；pH计：PE28型，瑞士梅特勒托利多公司；电导率仪：PE32型，瑞士梅特勒托利多公司；味觉分析系统：SA402B型，日本INSENT公司；纳米粒度及Zeta电位仪：Zetasizer Nano ZS型，英国马尔文公司。

1.3 方法

1.3.1 酸味剂特性研究

1）热稳定性研究：分别配制15 mmol/L的*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸，分别在不同温度（40、60、80、100、121 ℃）下处理15 min，热处理前为CK组，测定各溶液的pH及*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸质量浓度变化。采用热重分析仪分别对*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸样品进行热重特性测定。测定条件为：升温速率10 ℃/min，温度25~500 ℃，平衡气流量40 mL/min，吹扫气流量20 mL/min。

2）pH稳定性研究：分别配制15 mmol/L的*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸溶液，用1 mol/L的氢氧化钠溶液分别调节各溶液pH至2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0，将不同pH体系的*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸于121 ℃处理15 min，测定各溶液热处理后的pH及*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸质量浓度变化。

3）*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸质量浓度的测定：参照GB 1886.40—2015《食品安全国家标准 食品添加剂 *L*-苹果酸》、GB 1886.235—2016《食品安全国家标准 食品添加剂 柠檬酸》、GB/T 23877—2009《饲料酸化剂中柠檬酸、富马酸和乳酸的测定 高效液相色谱法》和GB 25544—2010《食品安全国家标准 食品添加剂 *DL*-苹果酸》中的HPLC方法测定*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的质量浓度。色谱条件为：色谱柱为C18色谱柱（250 mm×4.6 mm×5 μm），流动相为体积分数0.1%的磷酸与甲醇混合溶液（体积比97.5∶2.5），柱温40 ℃，进样量20 μL，紫外检测波长210 nm，流量1 mL/min。

1.3.2 不同酸味剂滋味测定

采用味觉分析系统分别对 2 g/L 的柠檬酸、*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸溶液的滋味进行检测，分析其酸味、甜味、咸味、苦味、涩味、后味 A（涩的回味）和后味 B（苦的回味）。电子舌各酸味剂的检测方法为：向测试传感器（CAO、NAO、AE1、CTO、GL1）中各加入 200 μL 内部溶液，在参比溶液中活化 24 h。向各参比电极中加入内部溶液至距管顶部 5 mm，随后用 3.3 mol/L 的氯化钾溶液活化参比电极 24 h[16]。传感器需根据类型在对应的阴离子或阳离子溶液中分别洗涤 90 s，随后分别在参比溶液 1 和参比溶液 2 中各洗涤 120 s。洗涤后的传感器需在参比溶液 3 中浸泡 30 s，测得该参比溶液的电势值 V_r；随后将传感器置于样品中浸泡 30 s，测得电势值 V_s。各基本味觉（酸味、苦味、涩味、咸味、甜味）的相对强度通过计算 V_s 与 V_r 的差值（V_s-V_r）得出，其中 CAO、NAO、AE1、CTO 和 GL1 传感器分别负责评估样品的酸味、苦味、涩味、咸味、甜味。NAO 与 AE1 这 2 个传感器分别在参比溶液 4 和参比溶液 5 中各洗涤 3 s，再一同置于参比溶液 6 中浸泡 30 s，测得参比溶液电势值 V_r'，V_r' 与 V_r 的差值（$V_r'-V_r$）即为样品的苦的回味（NAO 传感器）和涩的回味（AE1 传感器）的相对强度。

1.3.3 不同酸味剂在橙汁饮料体系中理化特性的测定

1）橙汁饮料体系的制备：采用橙汁浓缩汁配制质量分数分别为 10% 和 30% 的橙汁饮料体系，分别添加质量分数为 0.1% 的 *L*-苹果酸、柠檬酸和 *DL*-苹果酸，搅拌混匀后进行高压均质（压力为 15 MPa），得到橙汁饮料样液，分别命名为 C10-L-MA、C10-DL-MA、C10-CA 及 C30-L-MA、C30-DL-MA、C30-CA[17]，对应质量分数 10% 的橙汁饮料分别添加 *L*-苹果酸、*DL*-苹果酸和柠檬酸，及质量分数 30% 的橙汁饮料分别添加 *L*-苹果酸、*DL*-苹果酸和柠檬酸。

2）离心沉降率的测定：参照 Matsuo 等[18]的方法并稍加修改，分别量取 C10-L-MA、C10-DL-MA、C10-CA、C30-L-MA、C30-DL-MA、C30-CA 各 30 mL，在 10 000 *g* 条件下离心 1 min，测定样品离心前后在 450 nm 处的吸光度，每个样品测定 3 次。按式（1）计算样品的离心沉降率。

$$S=(1-A/A_0)\times 100\% \quad (1)$$

式中：

S——离心沉降率，%；

A——离心后样品的吸光度；

A_0——离心前样品的吸光度。

3）粒径的测定：采用纳米粒度及 Zeta 电位仪分别测定 C10-L-MA、C10-DL-MA、C10-CA、C30-L-MA、C30-DL-MA、C30-CA 的粒径分布。样品测定前振荡混匀，随后转移至比色皿中测定。仪器参数设置为：选择粒径模式，溶剂类型设为水相，平衡时间 60 s，每个样品测定 3 次。

4）Zeta 电位的测定：采用纳米粒度及 Zeta 电位仪分别测定 C10-L-MA、C10-DL-MA、C10-CA、C30-L-MA、C30-DL-MA、C30-CA 在 25 ℃下的 Zeta 电位。样品测定前振荡混匀，随后进样测定。仪器参数设置为：选中 Zeta 电位模式，溶剂类型设为水相，平衡时间 120 s，每个样品测定 3 次。

5）快速气相电子鼻检测：参照文献[19-20]的方法并稍加修改，取 5 mL 橙汁样品置于 20 mL 顶空瓶中密封，采用 HS 100 自动进样器进样，孵育温度 50 ℃，进样体积 2.5 mL，进样器温度 200 ℃，检测器温度 270 ℃，载气为氢气，流量 250 mm³/s。柱温程序为：初始温度 40 ℃保持 5 s，随后以 4 ℃/s 的速率升温至 270 ℃，保持 30 s。以空气为空白对照，每个样品测定 3 次。

1.4 数据处理

使用 Origin 2021 绘图，采用 SPSS 24.0 统计软件进行数据分析。利用 Statistix 8.0 软件进行数据分析时，采用单因素方差分析（ANOVA），通过最小显著性差异法（LSD）探究各平均值间的具体差异。所有试验均平行测定 3 次，结果以“平均值±标准偏差”表示。

2 结果与讨论

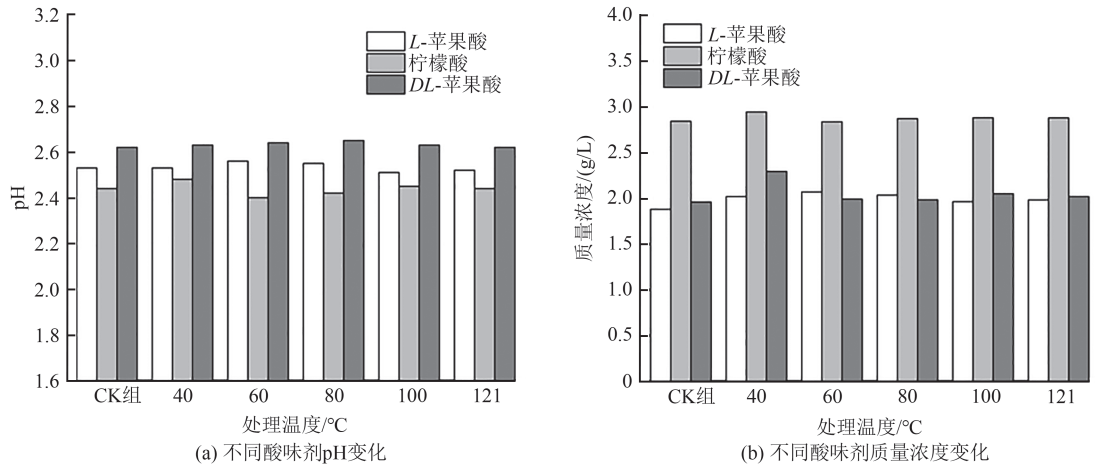
2.1 不同酸味剂的特性分析

2.1.1 热稳定性分析

将 15 mmol/L 的 *L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸分别在 40、60、80、100、121 ℃下处理 15 min，3 种酸味剂的热稳定性结果见图 1。经 40~121 ℃温度处理后，*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸体系的 pH 与热处理前基本无差异，说明 40~121 ℃的热处理不会影响 3 种酸味剂的 pH 稳定性，见图 1（a）。采用 HPLC 分析不同热处理温度下 3 种酸味剂的质量浓度变

化，见图1(b)。热处理后，3种酸味剂的质量浓度均未发生明显变化，表明40~121 ℃热处理不会造成*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸分解。综上所述，*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸这3种酸味剂可耐受40~121 ℃的热处理[21]。

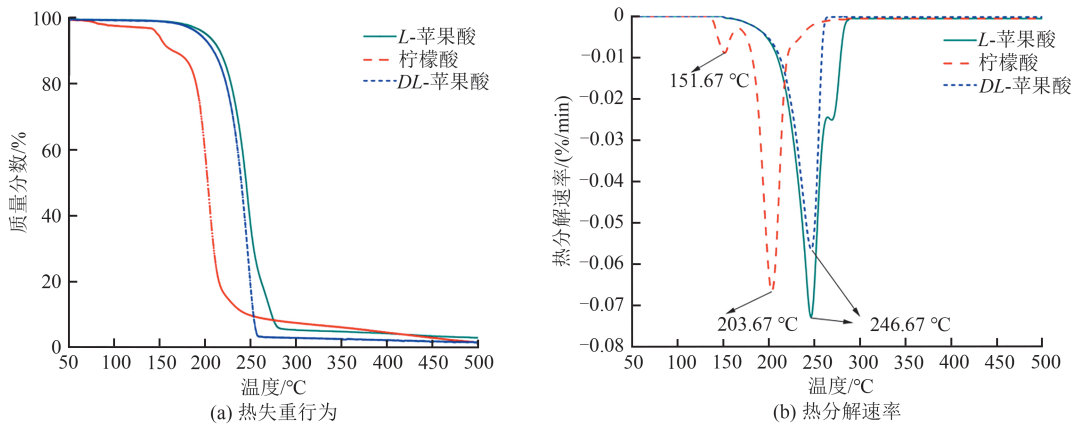
热重分析是一种常用的有效表征物质热性能的技术，可分析其在升温程序下的热分解行为(如失重行为、热分解速率)，进而评价其热稳定性。对*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的热分解特性进行分析，结果见图2。*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸的热失重温度区间分别为180~270 ℃和180~255 ℃，柠檬酸存在2个热失重温度区间，分别为137~178 ℃和178~260 ℃，见图2(a)。*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的最大热失重温度分别为246.67、203.67、246.67 ℃，见图2(b)。最大热失重温度越高，物质热稳定性越强，因此与柠檬酸相比，*L*-苹果酸与*DL*-苹果酸表现出更好的热稳定性。然而，在超过热失重温度后，*L*-苹果酸会迅速热分解；当温度达到500 ℃时，*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的热失重率分别为97.1%、98.5%、98.6%。



(a) 不同酸味剂pH变化　(b) 不同酸味剂质量浓度变化

图1　*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的热稳定性结果

Fig. 1　Thermal stability of *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid



(a) 热失重行为　(b) 热分解速率

图2　*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的热分解特性

Fig. 2　Thermal decomposition characteristics of *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid

2.1.2　pH稳定性分析

将15 mmol/L的*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸于pH 2.0~7.0、121 ℃处理15 min，各酸味剂的ΔpH变化见表1。在pH 2.0~7.0内，随着pH增大，*L*-苹果酸和柠檬酸的ΔpH呈先上升后下降的趋势。*DL*-苹果酸在pH为2.0的体系中，热处理后体系pH基本无变化；在pH 3.0~7.0的体系中，热处理后ΔpH均超过了0.15。

L-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸在不同pH下经热处理后pH变化并不明显，为进一步验证其稳定

表 1　3 种酸味剂在不同 pH 下经热处理后的 ΔpH 变化

Table 1　Changes in ΔpH after thermal treatment of the three sour agents at different pH levels

酸味剂	ΔpH					
	pH 2.0	pH 3.0	pH 4.0	pH 5.0	pH 6.0	pH 7.0
L-苹果酸	0	0.02	0.05	0.10	0.18	0.08
柠檬酸	0.03	0.04	0.09	0.23	0.18	0.10
DL-苹果酸	0	0.24	0.16	0.24	0.22	0.19

性，采用 HPLC 测定体系中 *L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的质量浓度变化，见图 3。不同 pH 条件下，*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸在 121 ℃热处理 15 min 后，质量浓度基本无变化。其中 *L*-苹果酸、*DL*-苹果酸的质量浓度为 1.94~2.03 g/L，柠檬酸质量浓度为 2.87~2.93 g/L。表明 *L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸作为酸味剂，在 pH 2.0~7.0 内具有良好的稳定性，尤其是在低 pH 体系中的稳定性更佳，适用于不同酸性食品体系。

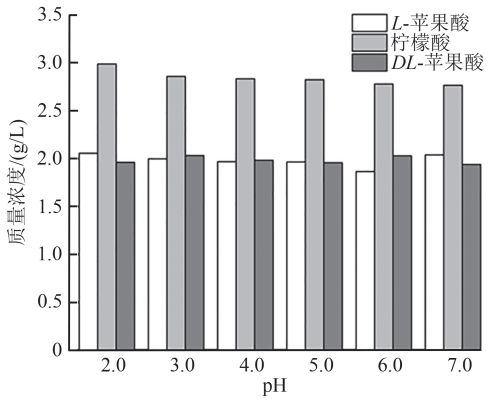


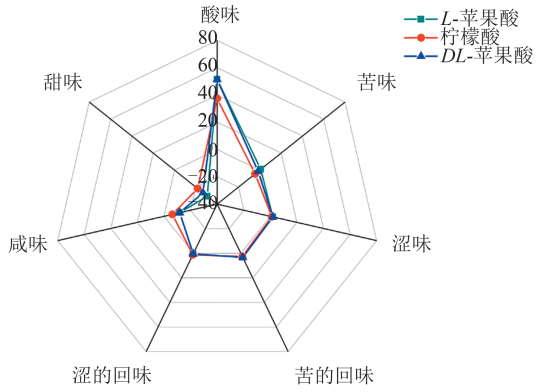
图 3　*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的 pH 稳定性

Fig. 3　pH stability of *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid

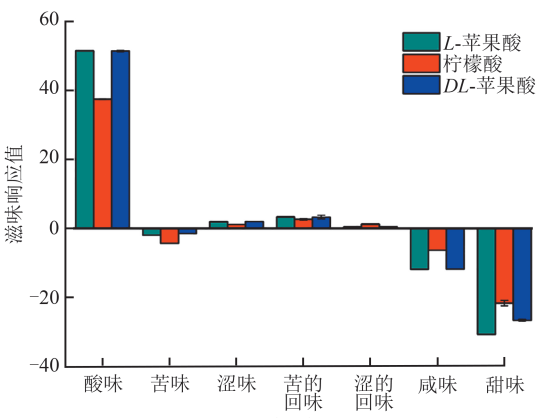
2.2　*L*-苹果酸滋味指标分析

2.2.1　滋味指标差异性分析

通过电子舌分析 *L*-苹果酸、柠檬酸和 *DL*-苹果酸在酸味、甜味、咸味、苦味、涩味、后味 A（涩的回味）和后味 B（苦的回味）7 个滋味指标上的差异[22]，见图 4。与柠檬酸相比，*L*-苹果酸的涩味增加了 63.79%，但涩的回味降低了 68.07%，说明 *L*-苹果酸涩味残留更低，吞咽后口腔发干、发涩的感觉不明显；*L*-苹果酸的酸味和苦的回味分别增加了 37.41% 和 26.05%。*L*-苹果酸与 *DL*-苹果酸的各滋味指标无明显差异。



(a) 滋味响应值雷达图



(b) 滋味响应值柱状图

图 4　*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸的滋味指标差异

Fig. 4　Differences in taste indicators between *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid

2.2.2　滋味整体结构差异性分析

对 *L*-苹果酸的滋味指标进行数字化评价，在构建矩阵的基础上，对 *L*-苹果酸的滋味品质进行主成分分析（PCA），见图 5。可以看出，主成分 1（PC1）的贡献率为 71.9%，主成分 2（PC2）的贡献率为 24.1%；*L*-苹果酸、*DL*-苹果酸及柠檬酸的检测点各自聚集，在空间排布上呈现一定的分离趋势。三者集中在原点附近，但分布存在差异。如 *DL*-苹果酸主要位于第一象限，*L*-苹果酸分布在第四象限，柠檬酸主要分布在 x 轴负方向。与柠檬酸相比，*L*-苹果酸和 *DL*-苹果酸的分布明显偏右，说明不同酸味剂的滋味存在一定差异，但 *L*-苹果酸与 *DL*-苹果酸的滋味更接近。

此外，基于 3 种酸味剂的不同滋味值，利用 SPSS 软件建立 Fisher 判别模型。模型中，观测值 x_1~x_7 分别代表酸味值、苦味值、涩味值、苦味

的回味值、涩味的回味值、咸味值、甜味值；y_1和y_2分别表示2个判别函数的计算值。建立的判别函数为：y_1=126.754x_1−92.994x_2−233.263x_3+64.563x_4，y_2=−6.882x_1+26.278x_2+39.857x_3−4.135x_4。其中*L*-苹果酸的判别函数值满足y_1>0、y_2<0，柠檬酸的判别函数值满足y_1<0、y_2<0，*DL*-苹果酸的判别函数值满足y_1>0、y_2>0。结果表明，结合电子舌检测数据，可通过Fisher判别模型对3种酸味剂进行快速识别[23]。

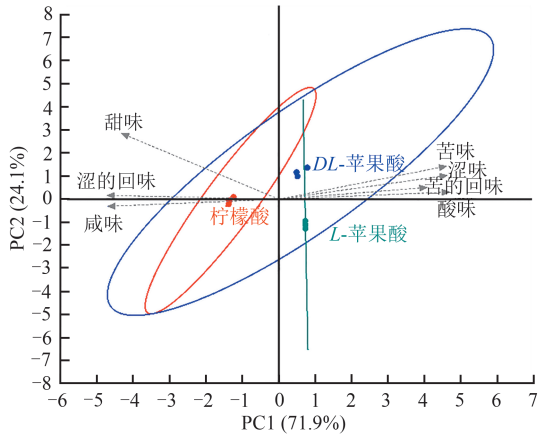


图5　*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸滋味品质的PCA结果

Fig. 5　PCA results of the taste quality of *L*-malic acid, citric acid, and *DL*-malic acid

2.3　酸味剂在橙汁饮料体系中的应用

2.3.1　不同酸味剂对橙汁pH、电导率和离心沉降率的影响

果汁的pH和电导率会影响其稳定性[24]。离心沉降率是评估离心过程中沉淀物形成情况的指标，在食品加工领域常用于评估果汁等液态食品的稳定性。*L*-苹果酸、柠檬酸、*DL*-苹果酸对橙汁pH、电导率和离心沉降率的影响见表2。在质量分数10%的橙汁中，添加柠檬酸的橙汁pH最低，为3.11±0.01，添加*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸的橙汁pH较高，均为3.21±0.02，该pH更有利于保持橙汁饮料体系的稳定性；添加*L*-苹果酸和柠檬酸的橙汁其电导率基本无差异，均稳定在约2.2 mS/cm；添加*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸橙汁的离心沉降率无显著差异（P>0.05）。在质量分数30%的橙汁中，添加柠檬酸和*DL*-苹果酸的橙汁电导率基本无差异；然而在离心沉降率方面，与柠檬酸相比，添加*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸的橙汁离心沉降率均增加了38.60%，表明添加柠檬酸更有利于维持橙汁的稳定。此外，与质量分数10%橙汁相比，质量分数30%橙汁的电导率明显升高，离心沉降率明显降低。推测高质量分数橙汁饮料体系中离心沉降率降低的原因，可能是果汁中的颗粒较大使体系的表观黏度增加[25]，导致颗粒难以沉降。综上所述，在质量分数10%的橙汁中，可优先选用*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸作为酸味剂；在质量分数30%的橙汁中，可优先选用柠檬酸作为酸味剂，以提升橙汁的稳定性。

表2　橙汁饮料体系的离心沉降率、pH和电导率

Table 2　Centrifugal sedimentation rate, pH, and electrical conductivity of orange juice beverage system

体系	酸味剂	离心沉降率/%	pH	电导率/mS/cm
质量分数10%橙汁	*L*-苹果酸	21.75±1.20^{a}	3.21±0.02^{c}	2.21±0.02^{c}
	柠檬酸	20.50±1.98^{a}	3.11±0.01^{d}	2.20±0.02^{c}
	DL-苹果酸	19.90±2.40^{a}	3.21±0.02^{c}	2.24±0.01^{c}
质量分数30%橙汁	*L*-苹果酸	5.96±0.11^{b}	3.42±0.05^{b}	4.92±0.04^{b}
	柠檬酸	4.30±1.22^{c}	3.42±0.02^{b}	5.07±0.01^{a}
	DL-苹果酸	5.96±1.85^{b}	3.48±0.12^{a}	5.09±0.01^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3.2　不同酸味剂对橙汁粒径和Zeta电位的影响

不同酸味剂对橙汁粒径的影响见图6(a)。可以看出，浓缩汁质量分数越高，体系粒径越大；与质量分数10%橙汁相比，质量分数30%橙汁的粒径平均增加了102.1%。在相同质量分数的橙汁中，不同酸味剂对橙汁粒径无显著影响（P>0.05）。因此，相较于酸味剂种类，浓缩汁质量分数对饮料体系粒径的影响更大，这可能是由于随着浓缩汁质量分数的增加，体系中的颗粒更容易聚集，进而形成更大的颗粒。

不同酸味剂对橙汁Zeta电位的影响见图6(b)。在质量分数10%的橙汁中，与添加柠檬酸的橙汁相比，添加*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸橙汁的Zeta电位分别增加了80.2%和92.1%；在质量分数30%的橙汁中，则呈现相反的趋势，添加*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸橙汁的Zeta电位明显降低，分别降低了51.4%和54.2%。通常情况下，Zeta电位的绝对值越大，体系稳定性越强。因此在质量分数10%的橙汁中，添加*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸可提升体系稳定性；而在质量分数30%的橙汁中，添加柠檬酸更有利于维持体系的稳定性。

2.3.3　不同酸味剂对橙汁挥发性风味物质的影响

添加不同酸味剂后，橙汁挥发性风味物质的

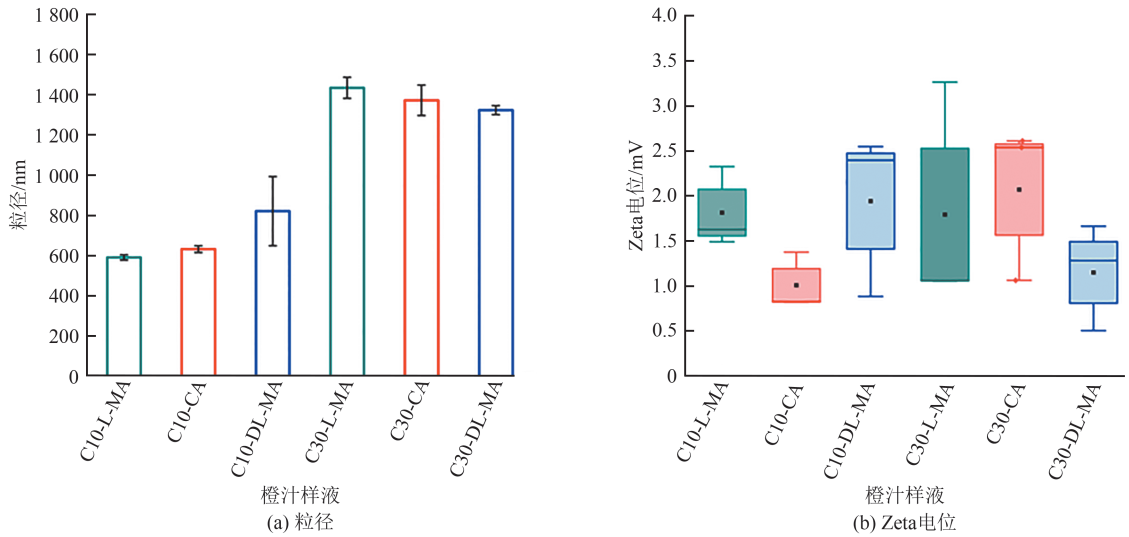


图 6　不同酸味剂对橙汁粒径和Zeta电位的影响

Fig. 6　Effects of different sour agents on the particle size and Zeta-potential of orange juice

PCA结果见图7。可以看出，PC1贡献率为87.2%，PC2贡献率为7.9%。不同质量分数橙汁样品点无重叠，且分布在不同的区域，表明不同质量分数橙汁的气味差异明显。已有研究报道，体系粒径会对挥发性风味物质产生影响，对氮氧化物、醇类和芳香化合物的影响更显著[26]；同时，挥发性风味物质与有机酸种类也存在一定关联[27]。在质量分数10%的橙汁中，添加*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的3组样品存在一定重叠，说明其挥发性风味物质相似；同样，在质量分数30%的橙汁中，这3组样品也出现重叠，表明其在挥发性风味物质上也具有一定的相似性。

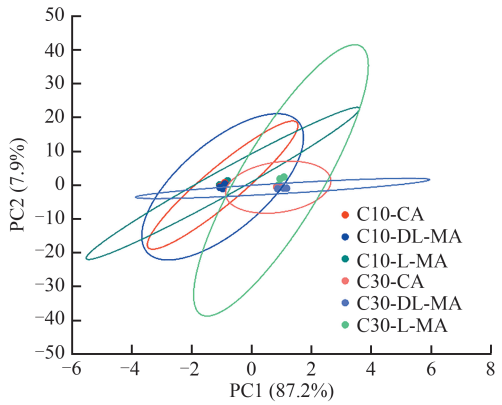


图 7　橙汁挥发性风味物质PCA结果

Fig. 7　PCA results of volatile flavor compounds of orange juice

以相关性最高的挥发性风味物质为对象，分析不同酸味剂对橙汁挥发性风味物质的影响，见图8。在不同质量分数的橙汁中，挥发性风味物质

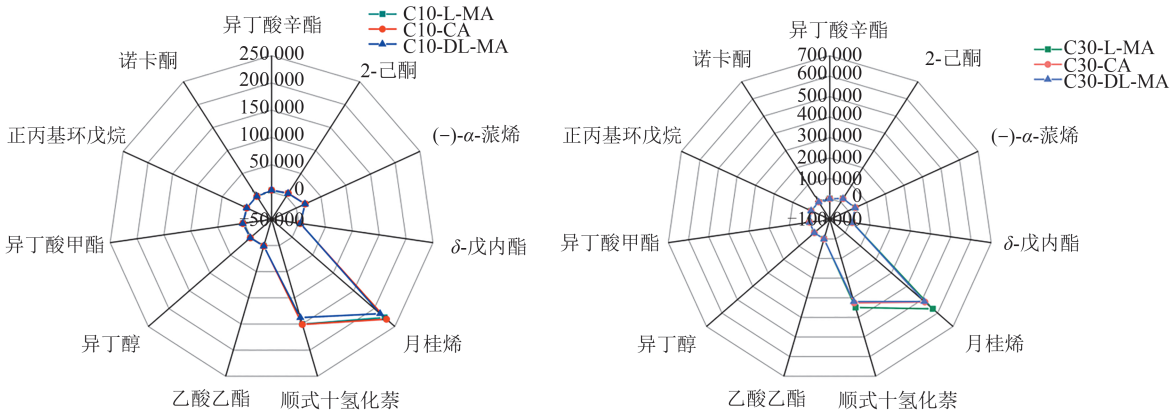


图 8　不同酸味剂对橙汁挥发性风味物质的影响

Fig. 8　Effects of different sour agents on the volatile flavor compounds of orange juice

的检测结果存在一定的差异。*δ*-戊内酯具有芳香气味，在质量分数10%的橙汁中，与添加柠檬酸的橙汁相比，添加*L*-苹果酸橙汁中的*δ*-戊内酯质量分数增加了10.3%；月桂烯具有热带水果香，顺式十氢化萘具有特殊的薄荷脑气味，在质量分数30%的橙汁中，与添加柠檬酸的橙汁相比，添加*L*-苹果酸橙汁中月桂烯和顺式十氢化萘质量分数分别增加了9.8%和7.1%。综上所述，不同酸味剂对橙汁挥发性风味物质的影响存在一定差异。

3 结论

该研究从热稳定性、pH稳定性和电子舌滋味品质变化这3个方面，分析了*L*-苹果酸、柠檬酸和*DL*-苹果酸的基本特性差异。结果表明，*L*-苹果酸在40~121 ℃、pH 2.0~7.0条件下具有较好的稳定性；在滋味品质方面，与等质量浓度的柠檬酸相比，*L*-苹果酸涩的回味更弱。另外，作者通过分析离心沉降率、pH、电导率、粒径、Zeta电位和挥发性风味物质差异，探究了3种酸味剂在橙汁中的应用特性。结果显示，在质量分数10%的橙汁中，可优先选用*L*-苹果酸和*DL*-苹果酸作为酸味剂；在质量分数30%的橙汁中，可优先选用柠檬酸作为酸味剂，更有利于提升橙汁的稳定性。综上，该研究明确了*L*-苹果酸作为食品酸味剂的理化特征，分析了其在橙汁中的应用特性，为*L*-苹果酸在食品工业中的推广应用提供了依据。

参考文献

[1] 周磊，刘伟，熊志强，等. 超声结合苹果酸处理对双孢蘑菇多酚氧化酶活性及失活动力学的影响[J]. 食品与机械，2014，30(1)：141-144，154.
ZHOU L，LIU W，XIONG Z Q，et al. Effect of combing ultrasound with malic acid on activity and inactivation kinetics of polyphenol oxidase from mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Food & Machinery，2014，30(1)：141-144，154.(in Chinese)

[2] BALMASEDA A，ROZÈS N，BORDONS A，et al. The use of *Torulaspora delbrueckii* to improve malolactic fermentation[J]. Microbial Biotechnology，2024，17(1)：e14302.

[3] AMRUTHA B，SUNDAR K，SHETTY P H. Effect of organic acids on biofilm formation and quorum signaling of pathogens from fresh fruits and vegetables[J]. Microbial Pathogenesis，2017，111：156-162.

[4] UNAL TURHAN E，POLAT S，ERGINKAYA Z，et al. Investigation of synergistic antibacterial effect of organic acids and ultrasound against pathogen biofilms on lettuce [J]. Food Bioscience，2022，47：101643.

[5] SU X Q，WU F F，ZHANG Y Q，et al. Effect of organic acids on bread quality improvement[J]. Food Chemistry，2019，278：267-275.

[6] 陈湘粤，高群玉，李倩，等. 有机酸对桑椹花色苷的辅色作用及其热降解动力学规律[J]. 现代食品科技，2022，38(6)：116-125.
CHEN X Y，GAO Q Y，LI Q，et al. Co-pigmentation of mulberry anthocyanins with organic acids：color enhancement and thermal degradation kinetics [J]. Modern Food Science and Technology，2022，38(6)：116-125.(in Chinese)

[7] 于小斐，魏文松，艾鑫，等. 有机酸处理对肉类品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技，2021，42(14)：387-393.
YU X F，WEI W S，AI X，et al. Research progress on the effect of organic acid treatment on meat quality [J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(14)：387-393.(in Chinese)

[8] 张宁. 食品和饲料中有机酸对肠道菌群的影响[J]. 现代食品，2023，29(15)：104-107.
ZHANG N. The effect of organic acids in food and feed on gut microbiota[J]. Modern Food，2023，29(15)：104-107.(in Chinese)

[9] PIVA A，PIZZAMIGLIO V，MORLACCHINI M，et al. Lipid microencapsulation allows slow release of organic acids and natural identical flavors along the swine intestine [J]. Journal of Animal Science，2007，85(2)：486-493.

[10] 李昌凡，林铭鑫，卢雪瑶，等. 线粒体代谢物转运及其在微生物细胞工厂应用中的研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(7)：32-43.
LI C F，LIN M X，LU X Y，et al. Research progress in mitochondrial metabolite transport and its application in microbial cell factories[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(7)：32-43.(in Chinese)

[11] 吴军林，吴清平，张菊梅，等. *L*-苹果酸的生物学功能研究新进展[J]. 食品工业，2015，36(9)：225-228.
WU J L，WU Q P，ZHANG J M，et al. New studies and progress of biological function of *L*-malate[J]. The Food Industry，2015，36(9)：225-228.(in Chinese)

[12] PRESCOTT J，RIPANDELLI N，WAKELING I. Binary taste mixture interactions in prop non-tasters，medium-tasters and super-tasters[J]. Chemical Senses，2001，26(8)：993-1003.

[13] 王仕钰，张立彦. 有机酸味剂对低钠盐增咸作用的研究[J]. 食品工业科技，2012，33(6)：370-373.
WANG S Y，ZHANG L Y. Enhancing effects of organic

acids on saltiness of low-sodium salt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(6): 370-373.(in Chinese)

[14] MIRANDA A M, INGRAM M, NUESSLE T M, et al. Factors affecting detection of a bimodal sour-savory mixture and inter-individual umami taste perception[J]. Food Quality and Preference, 2021, 89: 104147.

[15] PAN X, BI S, LAO F, et al. Factors affecting aroma compounds in orange juice and their sensory perception: a review[J]. Food Research International, 2023, 169: 112835.

[16] LIU Y, XI H, FU Y J, et al. Effects of organic acids on the release of fruity esters in water: an insight at the molecular level[J]. Molecules, 2022, 27(9): 2942.

[17] 孟令君,张煜,吴璐璐,等. 有机酸对赤霞珠干红葡萄酒的提酯增香效应研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 155-162.
MENG L J, ZHANG Y, WU L L, et al. Effects of organic acids on the ester-improving and aroma-enhancing of Cabernet Sauvignon red wine[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(1): 155-162.(in Chinese)

[18] MATSUO Y, AKITA K, TAGUCHI H, et al. Utilization and evaluation of *Citrus natsudaidai* peel waste as a source of natural food additives[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131464.

[19] 杨小丽,邹金,张振东,等. 基于电子舌技术常用酸味剂滋味品质的评价[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 140-144.
YANG X L, ZOU J, ZHANG Z D, et al. Taste profile characterization of commonly acidulant by electronic tongue analysis[J]. Food Research and Development, 2017, 38(11): 140-144.(in Chinese)

[20] 杜娜. 薏米不同处理方法对饮料的影响[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(6): 41-45.
DU N. The effects of different treatment methods of semen coicis on beverages[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(6): 41-45.(in Chinese)

[21] RÓŻAŃSKA A, DYMERSKI T, NAMIEŚNIK J. Novel analytical method for detection of orange juice adulteration based on ultra-fast gas chromatography[J]. Monatshefte Für Chemie-Chemical Monthly, 2018, 149(9): 1615-1621.

[22] 梁轶琳,张灵枝,戴浩民,等. HS-SPME-GC-MS分析武夷岩茶呈香挥发性物质[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 110-121.
LIANG Y L, ZHANG L Z, DAI H M, et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 110-121.(in Chinese)

[23] 郭莉,吴厚玖,王华,等. 加工过程中夏橙汁香气成分的SPME-GC-MS分析[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 259-263.
GUO L, WU H J, WANG H, et al. SPME-GC-MS analysis of aromatic compositions in Valencia orange juice during processing units[J]. Food Science, 2010, 31(24): 259-263.(in Chinese)

[24] BENÍTEZ E I, GENOVESE D B, LOZANO J E. Effect of pH and ionic strength on apple juice turbidity: application of the extended DLVO theory[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1): 100-109.

[25] GENOVESE D B, LOZANO J E. The effect of hydrocolloids on the stability and viscosity of cloudy apple juices[J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(1): 1-7.

[26] ZHU D S, SHEN Y S, WEI L W, et al. Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice[J]. Food Chemistry, 2020, 328: 126967.

[27] DU X F, ROUTRAY J, WILLIAMS C, et al. Association of refreshing perception with volatile aroma compounds, organic acids, and soluble solids in freshly consumed cucumber fruit[J]. ACS Food Science & Technology, 2022, 2(9): 1495-1506.

（责任编辑：刘冬梅）