刘旭龙, 孙萌彤, 肖凯, 等. 浓缩方式对莱阳梨膏流变学特性与风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 361−371. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070202

LIU Xulong, SUN Mengtong, XIAO Kai, et al. Effects of Concentration Methods on the Rheological Properties and Flavor Profile of Laiyang Pear Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 361−371. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070202

· 分析检测 ·

浓缩方式对莱阳梨膏流变学特性与风味的影响

刘旭龙[1], 孙萌彤[1], 肖　凯[2], 余　涛[1], 陈　伟[1,*], 郑振佳[1,*]

（1.山东农业大学食品科学与工程学院, 山东省高等学校食品营养与健康重点实验室, 山东泰安 271018;
2.烟台飞驰蜗牛农业发展有限公司, 山东烟台 265200）

摘　要: 为探究不同加工方式对莱阳梨膏流变学特性及风味成分差异的影响，本研究通过流变仪与气相色谱离子迁移谱联用（gas chromatography-ion mobility spectroscopy，GC-IMS）技术对 3 种自制梨膏（冷冻干燥浓缩、减压浓缩和常压熬煮）与 7 种采样梨膏进行流体类型分析和挥发性物质比较。结果表明，所有样品梨膏均属于假塑性流体，具有剪切稀化特性，剪切速率与剪切应力变化关系符合 Power Law 方程，拟合效果良好（R^2>0.99），其中通过冷冻干燥浓缩方法制备的莱阳梨膏流变学特性表现良好，在 10 种梨膏中没有表现出过度稀薄或黏稠的现象。GC-IMS 在 10 种梨膏中检验出不同的风味化合物质，共有的风味化合物质包括醛类化合物 15 种，酯类化合物 14 种，酮类化合物 13 种，醇类化合物 9 种，烯萜类化合物 5 种，羧酸类化合物 1 种，其他类化合物 4 种，通过正交偏最小二乘判别分析和相对气味活性值筛选出关键气味标志物为 2-甲基丁醛、2-甲基丙醛、己酸乙酯、丁酸乙酯，醛类和酯类风味化合物质通常与水果香气有关，与常压熬煮和减压浓缩方法制得的梨膏相比，冷冻干燥浓缩方法制得的梨膏中丁酸乙酯含量最高，其表现出果香味的香气特点，表明通过该种方法制得莱阳梨膏可以最大程度保留果香。综上，本研究为梨膏类产品的加工与多维度品质评价提供参考。

关键词: 梨膏, 浓缩工艺, 流变特性, 挥发性成分, 风味分析

中图分类号: TS255.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0361−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070202

本文网刊:

Effects of Concentration Methods on the Rheological Properties and Flavor Profile of Laiyang Pear Paste

LIU Xulong[1], SUN Mengtong[1], XIAO Kai[2], YU Tao[1], CHEN Wei[1,*], ZHENG Zhenjia[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong, Taian 271018, China;
2.Yantai Feichi Woniu Agricultural Development Co., Ltd., Yantai 265200, China）

Abstract: In order to investigate the effects of different processing methods on the rheological properties and flavor components of Laiyang pear paste, this study analyzed the fluid types and compared the volatile substances of three homemade pastes (freeze-drying concentration, vacuum concentration, and atmospheric boiling) and seven commercially sampled pastes by employing a rheometer and gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS). The results showed that all pear paste samples exhibited pseudoplastic fluid behaviors with shear-thinning characteristics. The relationship between shear rate and shear stress conformed to the Power Law model, demonstrating an excellent fit (R^2>0.99). Among the ten

收稿日期: 2025−07−17

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程（2024TSGC0483）; 莱阳梨精深加工与品质控制（FCWNYF2025001）。

作者简介: 刘旭龙（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 420161087@qq.com。

*** 通信作者:** 陈伟（1970−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: chenwei@sdau.edu.cn。

郑振佳（1985−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: zhengzhenjia@sdau.edu.cn。

samples, the paste prepared by freeze-drying concentration revealed the optimal rheological properties, showing neither excessive thinness nor thickness. Furthermore, GC-IMS identified different flavor compounds in 10 kinds of pear pastes and qualitatively detected the common flavor compounds, including 15 aldehydes, 14 esters, 13 ketones, 9 alcohols, 5 terpenes, 1 carboxylic acid, and 4 other compounds qualitatively. According to orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) and relative odor activity value (ROAV) screening, the key odor markers were identified as 2-methylbutanal, 2-methylpropanal, ethyl hexanoate, and ethyl butyrate. The flavor compounds of aldehydes and esters were typically associated with fruity aromas. Meanwhile, compared to pastes produced by atmospheric boiling and vacuum concentration, the paste prepared by freeze-drying concentration contained the highest level of ethyl butyrate, which contributed to a distinct fruity aroma. It indicated that the use of this method to produce Laiyang pear paste could maximize the preservation of the fruity aroma. In conclusion, findings of this study provide valuable insights for the processing and multi-dimensional quality evaluation of pear paste products.

Key words: pear paste; concentration process; rheological characteristic; volatile compounds; flavor analysis

莱阳梨, 又名莱阳茌(慈)梨, 是胶东半岛代表性果品, 入选《山东省中药材标准》, 是梨中较为罕见的兼具药用价值的品种。莱阳梨加工制成的梨膏, 有止咳化痰等功效, 具有较高的药用价值[1]。目前市售梨膏主要以鲜榨梨汁为原料, 经澄清、过滤、浓缩(常压熬煮浓缩或减压浓缩)等多道工序而成, 成品呈棕黄色或褐色的膏状[2]。近年来, 随着梨膏市场份额的增加, 对梨膏工艺与品质分析的研究逐步增加。李月等[3] 通过煮沸浓缩并结合护色工艺优化制备出气味和风味最优的鸭梨膏, 董雪君等[4] 采用真空浓缩方式制备出抗氧化能力强和总酚含量较高的莱阳梨清膏。由于不同梨膏原料和工艺参数不同, 生产的产品价格差异较大, 目前梨膏品质分析不足, 有待于进一步开展相关研究。

梨膏是流体食品, 通过测定其剪切力、黏度等参数, 解析流体食品的流变特性, 对品质评价具有重要意义。李月等[5] 通过流变学特性分析发现, 相较于真空浓缩工艺, 添加糖和胶会导致梨膏触变性减弱、黏度升高。风味是梨膏类食品的重要评价指标, 不同工艺参数会引起挥发性化合物产生差异, 赋予产品独特的风味特征[6−7], 李月等[8] 研究发现, 添加金银花浸提液会对梨膏气味和滋味产生影响, 使其品质变优。梨膏的风味成分研究报道较少, 尚待开展。

常压熬煮和减压浓缩方法制作梨膏效率较高, 温度条件会对梨膏风味产生影响, 低分子量风味成分损失较大。冷冻干燥浓缩方法可以减少高温对梨膏部分风味化合物的影响, 最大化保留梨汁中的成分。不同浓缩方式生产的梨膏风味成分存在差异, 研究结果可为优化梨膏生产工艺、提升产品质量及产品差异化开发提供科学依据。

本研究以多维度分析梨膏品质为研究目标, 选取莱阳梨为加工对象, 通过常压熬煮、减压浓缩与冷冻干燥浓缩制备莱阳梨膏, 并采集 7 个批次的莱阳梨膏, 通过流变仪和气相色谱离子迁移谱联用技术进行静态、动态流变学指标与风味特性分析, 系统考察不同浓缩方式对莱阳梨膏流体结构和挥发性香气成分的影响, 以期为梨膏类产品的加工工艺优化与品质评价提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莱阳梨　购自烟台飞驰蜗牛农业发展有限公司; 莱阳梨膏采样样品(编号 4~10)　采集于不同企业共 7 个批次。

MCR-102 型流变仪　奥地利 Anton Paar 公司; FlavourSpec®风味分析仪器(GC-IMS)　德国 GAS 公司; FD-304 真空冷冻干燥机　济南骏德仪器有限公司; 658 型气动压榨机　山东申东设备技术有限公司; 泰山牌可倾式夹层锅(生产编号 94256)　山东省泰安市轻工机械厂; AK002D 手持糖度仪　深圳市测友科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　梨膏制备　选取新鲜莱阳梨, 洗净去柄, 破碎榨汁, 果汁加热煮至 55 ℃, 加入 0.04%(wt%)果胶酶, 静置 2 h 得梨果汁, 果汁经四层纱布过滤后分为 3 份, 备用。样品 1(冷冻干燥浓缩梨膏)的制备过程为果汁经冷冻成冰后于真空冷冻干燥机中通过冷冻干燥进行浓缩, 设定样品仓温度为−18 ℃; 样品 2(减压浓缩梨膏)的制备过程为果汁在旋转蒸发仪中于 75 ℃ 温度条件下减压浓缩; 样品 3(常压熬煮梨膏)的制备过程为果汁采用常压熬煮浓缩工艺进行制备。浓缩过程中进行监测, 最终样品到达白利度为 80±1°Brix, 终止浓缩过程。

1.2.2　流变学特性实验

1.2.2.1　静态流变学测定　参考李月等[5] 的方法, 稍作修改。流动扫描模式下, 选用直径 25 mm 平行板测定系统, 设定平行板测定间距为 1 mm, 剪切速率范围为 1~500 s^{-1}, 选定变化规律为对数变化。测定自制与采样梨膏在 25 ℃ 温度条件下, 剪切应力(Pa)随剪切速率(s^{-1})的变化, 根据拟合情况判定不同梨膏流体类型。剪切速率和剪切应力是表征流变学特性的两个基本参数, 其表达方式用 Power Law 方程进行拟合[9]。

$$\tau = KD^n$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; K 为黏度系数, Pa·s^n;

D 为剪切速率，s^{-1}；n 为流动指数；n 值用于判断流体类型，n>1 时为胀塑性流体，n=1 时为牛顿流体，n<1 时为假塑性流体；K 值的大小体现流体的浓稠程度，K 值越大说明流体越黏稠[10]。

1.2.2.2　动态流变学测定　参考李月等[5] 的方法，稍作修改。振荡频率模式下，选用直径 25 mm 平行板测定系统，设置平行板测定间距为 1 mm，应变力 1%。在 25 ℃ 下，扫描 1~20 Hz 内，32 个数据采集点，选定变化规律为线性变化，观察梨膏储能模量 G'和损耗模量 G"变化情况。

1.2.3　挥发性风味物质测定　样品处理：称取梨膏样品 2.0 g 置于 20 mL 顶空瓶中，加水 1 mL，60 ℃ 条件下孵育 15 min 后进样。

GC 测试条件：MAX-WAX 色谱柱（30 m×0.53 mm，1 μm）；柱温 60 ℃；分析时间 30 min；载气为高纯氮气（纯度≥99.999%）；初始流速为 2 mL/min，保持 2 min；2~5 min 增至 10 mL/min；5~25 min 增至 100 mL/min；25~30 min 保持 100 mL/min。

IMS 测试条件：漂移气为高纯氮气（纯度≥99.999%）；漂移气体流速 150 mL/min；漂移管温度 60 ℃；漂移管长度 9.8 cm；管内线性电压 500 V/cm。设置进样针温度为 85 ℃，进样体积 200 μL。

使用仪器配套的分析软件 VOCal 内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对物质进行定性分析，使用 Gallery Plot 插件，定量比较样品之间挥发性有机物的差异。

1.2.4　相对气味活度值　ROAV 是一种结合阈值判定化合物重要性的方法，被广泛用于分析关键性风味化合物[11]。在 ROAV≥1 的化合物中，ROAV 越大，说明该化合物挥发性气味对总体风味贡献度越大，其计算公式参考刘登勇等[12] 的计算方法。

$$ROAV_i \approx \frac{C_i}{C_{Max}} \times \frac{T_{Max}}{T_i} \times 100$$

式中：$ROAV_i$ 表示相对气味活度值；C_i 和 T_i 分别表示为某挥发性物质的相对含量（%）和嗅觉阈值（μg/kg）；C_{Max} 表示每个处理组所测风味物质中相对含量的最大值（%）；T_{Max} 表示每个处理组所测风味物质中嗅觉阈值的最大值（μg/kg）。

1.3　数据处理

每组实验重复 3 次，利用风味分析仪内置的 NIST 数据库以及 IMS 数据库对挥发性香气成分进行定性分析，采用 Origin 2024 软件、SIMCA 14.1 软件对实验结果绘图分析，数据以平均值±标准偏差的形式表示，通过 SPSS 27.0 软件进行显著性差异分析。

2　结果与分析

2.1　流变学特性实验结果

2.1.1　静态流变学测定结果　图 1A 中，在 25 ℃ 条件下，10 种莱阳梨膏的剪切应力随剪切速率增大而提高，不同梨膏剪切速率和剪切应力的 Power Law 拟合方程见表 1。各拟合方程 R^2 均大于 0.99；n 值均小于 1，表明梨膏为假塑性流体且剪切稀化。样品 4 的 K 值为 36.46±4.09，黏度最高，样品 10 的 K 值为 6.68±0.48，黏度最低。

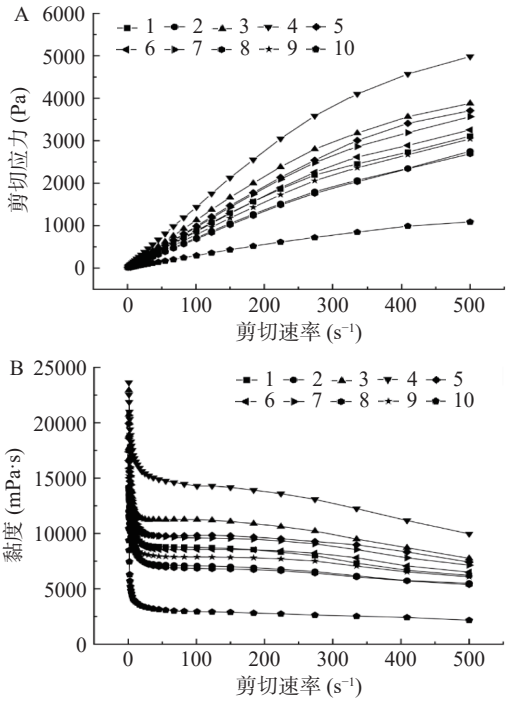


图 1　莱阳梨膏流变特性曲线

Fig.1　Rheological characteristic curves of Laiyang pear paste

注：A：剪切应力；B：黏度。

表 1　梨膏流体曲线的 Power Law 方程回归参数

Table 1　Regression parameters of Power Law equation for fluid curves of Laiyang pear paste

组别	K（$Pa·s^n$）	n	R^2
1	21.37±2.27	0.81±0.02	0.9937
2	14.36±1.05	0.85±0.01	0.9973
3	27.89±3.30	0.81±0.02	0.9922
4	36.46±4.09	0.80±0.02	0.9929
5	20.24±2.18	0.85±0.02	0.9943
6	18.32±1.99	0.84±0.02	0.9941
7	21.62±2.25	0.83±0.02	0.9944
8	13.72±0.98	0.86±0.01	0.9975
9	16.31±1.51	0.85±0.02	0.9958
10	6.68±0.48	0.83±0.01	0.9972

图 1B 为 10 种莱阳梨膏黏度随剪切速率增加而变化的流动特性曲线图。莱阳梨膏黏度随剪切速率提升均显著下降，说明样品具有明显的假塑性流体特征，具有良好的触变性[5]。剪切速率较小时，莱阳梨膏结构被破坏较少，表现出较高的黏度；随着剪切速率升高，样品中以长链形式存在的多糖分子链受到破坏程度增加，导致结构破坏和网络瓦解，各组分分子间相互作用力减弱，黏度下降，表现出剪切稀化现象[10]。10 种莱阳梨膏中，样品 4 和样品 10 黏度差异最大，不同的加工工艺会导致莱阳梨膏黏度产生不同表现。冷冻干燥浓缩方式减少了高温的影响，相比较

于减压浓缩和常压熬煮方式其制作时间更长，黏度主要受梨膏中水分含量的影响，在减压浓缩和常压熬煮过程中，高温会加剧流体分子的热运动，提高分子内部的摩擦频率，导致梨膏体系黏度增大[13]。王大琴[13] 制备的梨膏中也观察到类似现象，在更高熬煮温度条件下梨膏黏度会更高。

2.1.2 动态流变学测定结果 储能模量 G'和损耗模量 G"反映流体的黏弹性大小，体现流体所具有的液体（黏性）或固体（弹性）特性[5]，可以评估梨膏的总体强度。G'代表黏弹性行为的弹性分量，表征样品的固体性质；G"代表黏弹性行为的黏性分量，反映了样品的液体性质[14]。不同莱阳梨膏的储能模量 G'和损耗模量 G"情况见图 2。在 25 ℃ 条件下，扫描频率 1~20 Hz 范围内，随着扫描频率增高，储能模量 G'和损耗模量 G"均增高，结果表明，大部分莱阳梨膏样品 G">G'，说明莱阳梨膏主要发生黏性形变，表现出液体黏度特性[15]。采样的莱阳梨膏产品由于具体加工参数不同，其储能模量 G'和损耗模量 G"表现不同，10 号样品主要趋势表现为 G'>G"，体现弹性主导行为，表现出类似软凝胶类的黏弹性行为[16]。10 种莱阳梨膏动态流变学特性存在差异，是因为加工方式以及具体加工工艺不同。冷冻干燥浓缩方法避免了高温破坏和美拉德反应，较大程度保留糖类、蛋白质等大分子物质，在梨膏中可以形成稳定的胶体结构[17]。减压浓缩和常压熬煮方式制作的梨膏受温度条件影响，糖类和蛋白类聚合物出现分子链伸展和空间构象改变，亲水基团暴露，更多的结合位点受分子间氢键等多种作用力相互交联，构成凝胶网络，减压浓缩因浓缩时间较常压熬煮方式时间更长，其促进了水分子与亲水基团结合，纤维素分布均匀，形成的纤

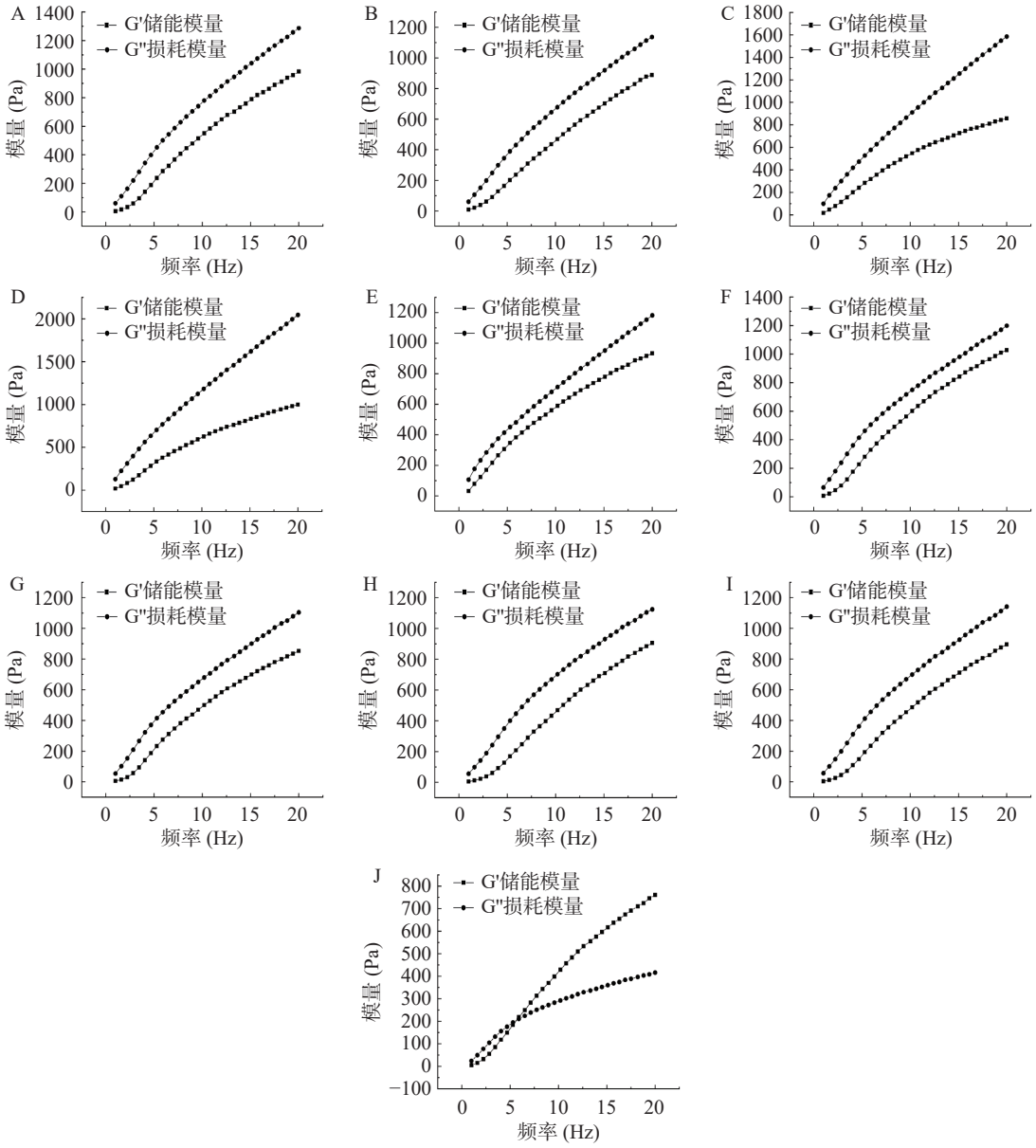


图 2 不同梨膏储能模量 G'和损耗模量 G"

Fig.2 Storage modulus G' and loss modulus G" of different Laiyang pear paste

注：A~C 分别表示冷冻干燥浓缩梨膏、减压浓缩梨膏、常压熬煮梨膏；D~J 分别表示采样梨膏 4~10。

维框架能够强化体系中的凝胶网络，常压熬煮方法下，更高的温度为美拉德反应提供条件，促进了蛋白质分子的共价交联，提高了梨膏的黏性[18−19]，对比 10 种梨膏储能模量 G'和损耗模量 G"，冷冻干燥浓缩方式制作的梨膏综合表现良好，结合静态流变学测定结果，说明该方法下制得的莱阳梨膏具有良好的黏弹性。

2.2　挥发性风味成分分析

2.2.1　不同莱阳梨膏挥发性化合物分析　不同莱阳梨膏挥发性化合物分析图谱见图 3。1.0 处红色竖线为反应离子峰，反应离子峰右侧每一个点代表一种挥发性香气成分，不同颜色代表物质的浓度不同，红色越深代表浓度越大，白色表示浓度较低[20]。由图 3 可知，在样品 1~3 中，冷冻干燥浓缩方法制作的梨膏所含风味物质种类更多，样品 4~10 中所含风味物质的种类和浓度存在差异。

2.2.2　挥发性化合物指纹图谱分析　不同莱阳梨膏挥发性化合物指纹图谱见图 4。每行表示一个样品的所有挥发性风味物质，每列表示不同梨膏中相同的挥发性化合物，由于电离作用和浓度原因，其中部分化合物被检测为单体(-M)和二聚体(-D)[21]。未知物质信号峰用 ID-表示，信号强度以颜色来表示：颜色越接近红色，表明该化合物浓度越高。对比三种自制

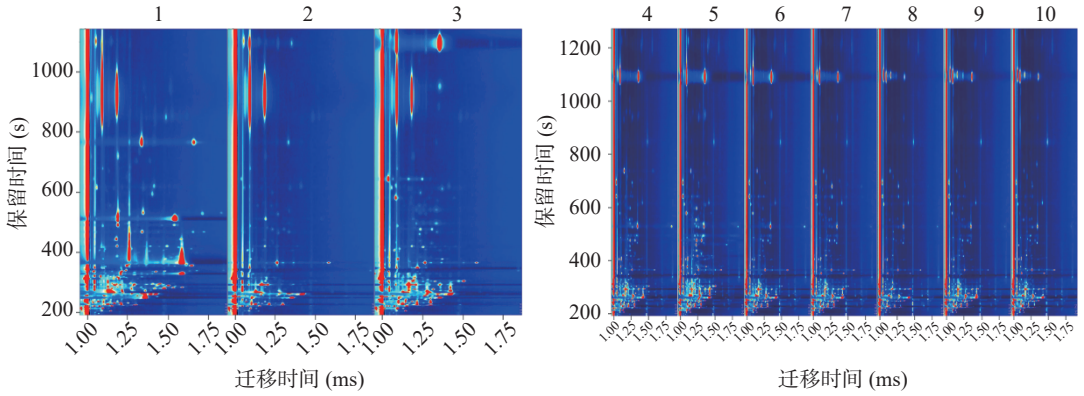


图 3　不同莱阳梨膏 GC-IMS 二维谱图

Fig.3　Two-dimensional GC-IMS spectra of different Laiyang pear paste

注：标号 1~3 分别代表冷冻干燥浓缩梨膏、减压浓缩梨膏、常压熬煮梨膏，标号 4~10 分别代表市场采样梨膏 4~10。

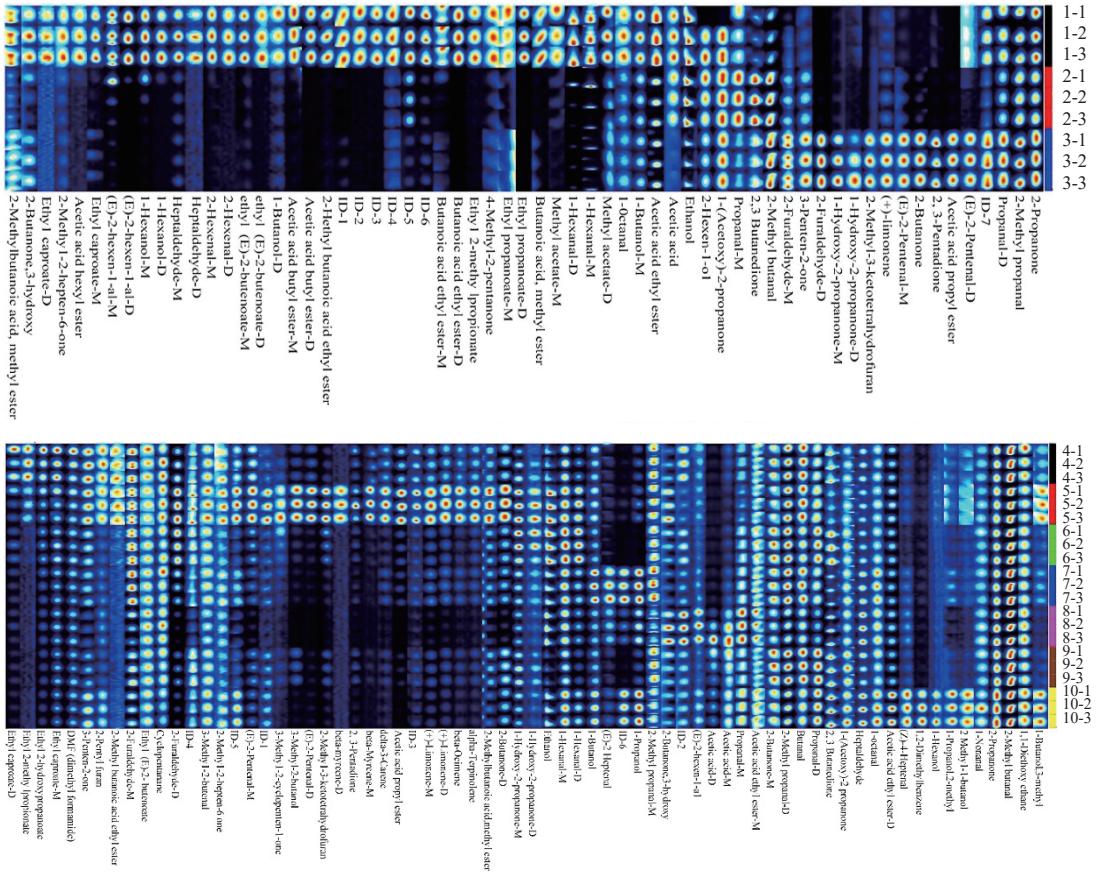


图 4　不同莱阳梨膏挥发性物质指纹图谱

Fig.4　Fingerprints of volatile components of different Laiyang pear paste

莱阳梨膏指纹图谱发现，冷冻干燥浓缩梨膏中特征挥发性风味物质种类最多，包括乙醇、醋酸、乙酸乙酯、1-丁醇-M、正辛醛、乙酸甲酯-D、1-己醇-M、1-己醇-D、乙酸甲酯-M、丁酸甲酯、丙酸乙酯-D、丙酸乙酯-M、4-甲基-2-戊酮、异丁酸乙酯、丁酸乙酯-D、丁酸乙酯-M、2-甲基丁酸甲酯、乙酸丁酯-D、乙酸丁酯-M、1-丁醇-D、反式-2-丁烯酸乙酯-D、反式-2-丁烯酸乙酯-M、3-己烯醛-D、2-己烯醛-M、庚醛-D、庚醛-M、2-己醛-D、1-己醛-M、反式-2-己烯醛-D、反式-2-己烯醛-M、己酸乙酯-M、乙酸己酯、2-甲基-2-庚烯-6-酮、己酸乙酯-D、3-羟基-2-丁酮、2-甲基丁酸甲酯。减压浓缩制得梨膏中含量较高的挥发性物质为 2,3-丁二酮、丙醛-M。常压熬煮制得梨膏中特征挥发性风味物质较多，包括 2-丙酮、2-甲基丙醛、丙醛-D、反式-2-戊烯醛-D、乙酸丙酯、2,3-戊二酮、2-丁酮、反式-2-戊烯醛-M、(R)-柠檬烯、2-甲基-3-酮四氢呋喃、1-羟基-2-丙酮-D、1-羟基-2-丙酮-M、2-呋喃醛-D、3-戊烯-2-酮、2-呋喃醛-M、2-甲基丁醛。该结果表明，通过冷冻干燥浓缩方法制作的梨膏中特征风味物质种类更多，说明温度条件会影响梨膏中部分风味化合物的生成，而常压熬煮方法制作的梨膏所含特征风味物质种类多于减压浓缩方法制作的梨膏，是因为高温为美拉德反应提供了条件[19]，产生了部分不同于减压浓缩温度条件下生成的风味物质。采集的不同莱阳梨膏产品表现出不同的特征谱图信息，由图 4 可知，其中样品 9 缺少区分于其他采样梨膏的特征香气成分，样品 5 所含特征香气成分更多，包括乙醇、1-羟基-2-丙酮-D、1-羟基-2-丙酮-M、2-丁酮-D、2-甲基丁酸甲酯、α-松油烯、β-罗勒烯、(R)-柠檬烯-D、(R)-柠檬烯-M、乙酸丙酯、δ-3-蒈烯、β-月桂烯-M、2,3-戊二酮、β-月桂烯-D、2-甲基-3-酮四氢呋喃、反式-2-戊烯醛-D、3-甲基-2-丁醇、3-甲基-2-环戊烯-1-酮、反式-2-戊烯醛-M、2-甲基-2-庚烯-6-酮、3-甲基-2-丁烯醛、2-呋喃醛-D。冷冻干燥浓缩方式降低了高温对梨膏部分风味物质的影响，其产生的风味物质相较于减压浓缩和常压熬煮方法有所不同，自制的减压浓缩和常压熬煮梨膏与采样产品莱阳梨膏加工工艺类似，但是因为具体加工参数的不同，产品风味成分存在差异。

2.2.3 不同莱阳梨膏挥发性组分的定性分析 通过气相色谱-离子迁移谱技术对 10 种莱阳梨膏的风味成分及物质相对含量进行分析鉴定。梨膏中检测出共有的挥发性化合物 61 种，如表 2 所示，包括醛类化合物 15 种、酯类化合物 14 种、酮类化合物 13 种、醇类化合物 9 种、烯萜类化合物 5 种、羧酸类化合物 1 种、其他类化合物 4 种。种类数量和含量均较高的挥发性风味物质主要集中在醛类、酮类和酯类，不同来源及加工方法制作的梨膏中风味化合物质有所不同，其中己酸乙酯(呈甜香气味特征)、2-甲基丁醛(呈杏仁味、可可香气味特征)、醋酸(水果味气味特征)[22−23] 含量在样品 4~10 中较样品 1~3 中更高，而 2-己烯-1-醇在样品 1~3 中相对含量较高，该种风味物质表现出青草香和果香的气味特点[24]。冷冻干燥浓缩方法制作的梨膏中，1-己醛、乙酸丁酯和丁酸乙酯含量明显较其余组更高，以上风味物质主要呈现梨果香和青草香，梨成熟果实中常存在这些挥发性芳香物质[25]，推测为此种条件加工对梨膏中这些挥发性物质影响较小，可以更好保留原有的果实香气。乙酸己酯具有典型梨果香味特征[25]，在冷冻干燥浓缩产品中该成分含量更高，同样说明温度过高会使梨膏损失部分梨果原有香味。10 种样品的 2-呋喃醛含量具有显著(P<0.05)差异，其为梨膏贡献焦糖香味，在冷冻干燥浓缩条件下制作的梨膏中测得含量明显小于减压浓缩和常压熬煮条件制作的梨膏，该成分在采样梨膏中广泛存在且含量较高，证明高温条件会影响 2-呋喃醛产生，其通常出现在美拉德反应和焦糖化反应中，产生受加热温度和时间影响[26−27]。

2.2.4 不同莱阳梨膏风味成分 OPLS-DA 及 VIP 分析 不同莱阳梨膏风味成分 OPLS-DA 及 VIP 分析结果见图 5。正交偏最小二乘判别分析(图 5A)结果显示，R^2X、R^2Y、Q^2 分别为 0.996、0.981、0.912，均超过 0.5，R^2 越接近 1 表示拟合度越高，Q^2 越接近 1 表示预测性越好[28]，所有点均在置信区间内，表示此模型拟合下具有良好的解释力和拟合程度，没有出现过拟合现象。此外，各样品之间聚类能力良好，组间有明显差距，能完成各组之间的分离。通过置换检验(n=200)对 OPLS-DA 模型进行可靠度验证，如图 5B 所示，图中横坐标为样品的保留度，1.0 处的点为原模型的 R^2 和 Q^2。模型 Q^2 回归线与横坐标的截距为负数，表示模型无过拟合且稳定可靠。VIP 值≥1 表示对于梨膏样品组间差异判别贡献度较高，VIP 值越大，贡献越大[29]，图 5C 中 VIP≥1(红色柱状图)包含的特征风味挥发性物质为 2-呋喃醛-D、乙酰氧基-2-丙酮、2-己烯-1-醇、2-呋喃醛-M、醋酸-M、乙醇、1-己醇-D、2-甲基丁醛、2-丙酮、2,3-丁二酮、1-丙醇、醋酸-D、反式-2-己烯醛-D、己酸乙酯-M、乙酸乙酯、反式-2-庚醛、1-己醇-M、2-丁酮-D、2-羟基丙酸乙酯、己酸乙酯-D、二甲基甲酰胺、2-甲基丙醛-M、丁酸乙酯-D，表明在 10 种莱阳梨膏中，这些风味成分是区分梨膏差异的重要特征标志物，对区分不同莱阳梨膏起关键作用，其中 VIP 值最高的化合物为 2-呋喃醛-D，其为梨膏贡献焦糖味香气，是在温度较高条件下制作的梨膏中常见的风味物质。

2.2.5 不同莱阳梨膏风味成分 ROAV 分析 在评估样品风味特性时，风味形成受挥发性物质浓度影响，同时需达到嗅觉阈值才能被感知。采用 ROAV 计算方法，计算莱阳梨膏中挥发性物质的 ROAV，结果见表 3。0.1<ROAV<1 的化合物被认为对整体气味有修饰作用，ROAV≥1 的化合物为关键性风味成分[30]。在 10 种梨膏中，1≤ROAV≤100 的挥发性化

表 2　不同莱阳梨膏挥发性成分含量

Table 2　Volatile compound content in different Laiyang pear paste

化合物种类	化合物名称（英文）	化合物名称（中文）	分子式	相对含量(%)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
醇类	2-Hexen-1-ol	2-己烯-1-醇	$C_6H_{12}O$	14.84±1.75^{b}	23.86±1.16^{a}	12.72±0.40^{c}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}
	1-Hexanol	1-己醇	$C_6H_{14}O$	3.85±0.11^{a}	1.16±0.78^{b}	0.39±0.03^{c}	0.36±0.03^{c}	0.28±0.03^{c}	0.29±0.01^{c}	0.38±0.06^{c}	0.44±0.01^{c}	0.40±0.05^{c}	0.73±0.08^{bc}
	1-Butanol	1-丁醇	$C_4H_{10}O$	0.38±0.1^{de}	0.39±0.02^{d}	0.31±0.01^{fg}	0.34±0.04^{ef}	0.33±0.01^{f}	0.28±0.01^{g}	0.65±0.04^{a}	0.47±0.0^{c}	0.38±0.02^{de}	0.60±0.03^{b}
	1-Butanol-3-methyl	3-甲基-1-丁醇	$C_5H_{12}O$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.15±0.01^{c}	0.20±0.01^{b}	0.10±0.02^{d}	0.14±0.01^{c}	0.11±0.02^{d}	0.10±0.02^{d}	0.34±0.00^{a}
	1-Butanol-2-methyl	2-甲基-1-丁醇	$C_5H_{12}O$	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.08±0.01^{b}	0.08±0.00^{b}	0.06±0.01^{c}	0.08±0.00^{b}	0.07±0.01^{b}	0.06±0.01^{c}	0.28±0.00^{a}
	Ethanol	乙醇	C_2H_6O	4.24±0.17^{cd}	5.19±0.46^{ab}	2.40±0.05^{f}	2.82±0.21^{e}	4.38±0.08^{c}	4.98±0.05^{b}	3.93±0.08^{d}	5.35±0.25^{a}	1.54±0.09^{g}	4.18±0.02^{cd}
	2-Methyl-1-propanol	2-甲基-1-丙醇	$C_4H_{10}O$	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.16±0.00^{e}	0.16±0.01^{c}	0.09±0.00^{f}	0.18±0.01^{b}	0.12±0.01^{e}	0.14±0.01^{d}	0.40±0.01^{a}
	1-Propanol	1-丙醇	C_3H_8O	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.42±0.04^{d}	0.41±0.04^{d}	0.12±0.01^{e}	1.93±0.15^{b}	1.54±0.09^{c}	0.49±0.03^{d}	2.10±0.06^{a}
	3-Methyl-2-butanol	3-甲基-2-丁醇	$C_5H_{12}O$	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.21±0.01^{c}	0.89±0.01^{a}	0.14±0.14^{d}	0.09±0.00^{e}	0.08±0.01^{f}	0.35±0.02^{b}	0.09±0.01^{e}
醛类	2-Furaldehyde	2-呋喃醛	$C_5H_4O_2$	2.58±0.08^{f}	7.01±0.77^{e}	30.52±0.90^{b}	33.04±2.92^{b}	39.31±1.01^{a}	42.10±0.43^{a}	32.28±2.27^{b}	13.93±4.88^{d}	22.92±2.16^{c}	15.44±1.25^{d}
	1-Octanal	正辛醛	$C_8H_{16}O$	0.18±0.01^{f}	0.14±0.02^{f}	0.13±0.02^{f}	0.45±0.02^{d}	0.36±0.03^{e}	0.43±0.05^{de}	0.64±0.06^{b}	0.78±0.04^{a}	0.55±0.06^{c}	0.75±0.04^{a}
	(E)-2-Hexen-1-al	反式-2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	9.26±0.27^{a}	1.63±1.38^{b}	0.48±0.03^{c}	0.18±0.01^{c}	0.15±0.02^{c}	0.14±0.01^{c}	0.18±0.02^{c}	0.43±0.02^{c}	0.17±0.01^{c}	0.27±0.01^{c}
	Heptaldehyde	庚醛	$C_7H_{14}O$	0.55±0.00^{e}	0.23±0.01^{gh}	0.19±0.00^{h}	0.42±0.01^{e}	0.28±0.02^{g}	0.34±0.02^{f}	0.49±0.06^{d}	0.71±0.04^{a}	0.45±0.04^{de}	0.62±0.03^{b}
	(Z)-4-Heptenal	顺式-4-庚醛	$C_7H_{12}O$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.09±0.01^{e}	0.08±0.01^{e}	0.08±0.01^{e}	0.16±0.01^{c}	0.23±0.02^{b}	0.12±0.01^{d}	0.48±0.01^{a}
	(E)-2-Heptenal	反式-2-庚醛	$C_7H_{12}O$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.35±0.05^{d}	0.21±0.00^{de}	0.18±0.01^{e}	1.46±0.21^{a}	1.10±0.08^{b}	0.31±0.04^{de}	0.53±0.05^{c}
	2-Hexenal	2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	0.90±0.02^{a}	0.18±0.02^{b}	0.13±0.01^{c}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}
	1-Hexanal	1-己醛	$C_6H_{12}O$	18.54±0.67^{a}	3.84±2.12^{b}	2.23±0.07^{c}	1.75±0.04^{c}	2.17±0.06^{c}	3.02±0.11^{bc}	2.51±0.10^{bc}	2.69±0.06^{bc}	1.62±0.05^{c}	2.86±0.05^{bc}
	(E)-2-Pentenal	反式-2-戊烯醛	C_5H_8O	0.11±0.00^{g}	0.25±0.02^{f}	0.66±0.01^{c}	0.91±0.02^{b}	1.43±0.03^{a}	0.46±0.01^{e}	0.47±0.03^{e}	0.21±0.02^{f}	0.52±0.01^{d}	0.49±0.02^{de}
	2-Methyl butanal	2-甲基丁醛	$C_5H_{10}O$	1.10±0.04^{h}	4.31±0.44^{g}	4.72±0.06^{g}	9.87±0.22^{d}	6.20±0.07^{f}	7.62±0.14^{e}	10.45±0.43^{c}	11.00±0.24^{b}	12.64±0.08^{a}	10.78±0.25^{bc}
	2-Methyl propanal	2-甲基丙醛	C_4H_8O	0.65±0.03^{f}	1.28±0.13^{e}	1.13±0.02^{e}	4.38±0.12^{b}	3.28±0.02^{d}	4.04±0.04^{c}	5.22±0.20^{a}	4.34±0.15^{b}	5.35±0.07^{a}	4.00±0.12^{c}
	Propanal	丙醛	C_3H_6O	0.74±0.03^{g}	1.17±0.11^{f}	1.21±0.02^{f}	1.63±0.03^{d}	1.37±0.02^{e}	1.87±0.04^{c}	1.98±0.11^{b}	1.99±0.03^{b}	2.55±0.02^{a}	2.60±0.06^{a}
	Butanal	丁醛	C_4H_8O	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	1.08±0.03^{c}	0.88±0.01^{e}	0.76±0.03^{f}	1.14±0.04^{b}	0.99±0.03^{d}	1.24±0.01^{a}	1.10±0.02^{bc}
	1-Nonanal	1-壬醛	$C_9H_{18}O$	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.69±0.02^{bcd}	0.53±0.04^{d}	0.65±0.05^{cd}	0.73±0.03^{bc}	1.05±0.04^{a}	0.86±0.09^{b}	1.12±0.26^{a}
	3-Methyl-2-butenal	3-甲基-2-丁烯醛	C_5H_8O	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.15±0.00^{d}	0.12±0.00^{e}	0.16±0.01^{d}	0.18±0.01^{c}	0.20±0.01^{b}	0.20±0.00^{b}	0.22±0.01^{a}
酮类	1-(Acetoxy)-2-propanone	乙酰氧基-2-丙酮	$C_5H_8O_3$	19.72±0.11^{c}	34.84±2.22^{a}	24.89±0.51^{b}	3.50±0.07^{f}	3.01±0.05^{f}	3.62±0.29^{ef}	4.09±0.24^{def}	5.06±0.19^{d}	4.95±0.15^{de}	5.34±0.25^{d}
	2-Methyl-2-hepten-6-one	2-甲基-2-庚烯-6-酮	$C_8H_{14}O$	0.41±0.00^{a}	0.22±0.03^{ef}	0.17±0.02^{f}	0.42±0.01^{a}	0.32±0.04^{bc}	0.25±0.02^{de}	0.37±0.05^{ab}	0.40±0.02^{a}	0.28±0.02^{cd}	0.42±0.04^{a}
	2-Butanone,3-hydroxy	3-羟基-2-丁酮	$C_4H_8O_2$	0.34±0.02^{f}	0.21±0.04^{g}	0.30±0.02^{fg}	0.49±0.03^{e}	0.66±0.05^{cd}	0.55±0.06^{de}	0.49±0.03^{e}	1.35±0.15^{a}	0.86±0.07^{b}	0.71±0.04^{c}
	1-Hydroxy-2-propanone	1-羟基-2-丙酮	$C_3H_6O_2$	0.38±0.00^{c}	0.62±0.10^{c}	2.28±0.39^{a}	1.85±0.31^{b}	2.27±0.12^{ab}	2.59±0.27^{a}	2.22±0.04^{ab}	2.26±0.12^{ab}	2.63±0.27^{a}	2.23±0.13^{ab}
	2-Methyl-3-ketotetrahydrofuran	2-甲基-3-酮四氢呋喃	$C_5H_8O_2$	0.15±0.04^{g}	0.32±0.02^{f}	1.06±0.05^{b}	0.50±0.05^{d}	1.99±0.06^{a}	1.00±0.08^{b}	0.49±0.02^{de}	0.41±0.05^{e}	0.87±0.05^{c}	0.48±0.02^{de}
	3-Penten-2-one	3-戊烯-2-酮	C_5H_8O	0.04±0.00^{g}	0.18±0.02^{f}	0.24±0.01^{e}	0.55±0.01^{a}	0.39±0.01^{b}	0.31±0.00^{d}	0.34±0.01^{c}	0.22±0.01^{e}	0.29±0.01^{d}	0.54±0.02^{a}

续表 2

化合物种类	化合物名称（英文）	化合物名称（中文）	分子式	相对含量(%)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
酯类	2,3-Pentadione	2,3-戊二酮	$C_5H_8O_2$	0.15±0.01^{d}	0.10±0.01^{d}	1.23±0.10^{a}	0.35±0.11^{c}	0.55±0.22^{b}	0.25±0.01^{cd}	0.23±0.03^{cd}	0.19±0.03^{cd}	0.33±0.03^{c}	0.19±0.02^{cd}
	2,3 Butanedione	2,3-丁二酮	$C_4H_6O_2$	0.56±0.02^{h}	3.00±0.30^{bcd}	2.10±0.05^{e}	2.93±0.04^{cd}	1.53±0.04^{g}	3.07±0.08^{bc}	1.81±0.06^{f}	2.81±0.10^{d}	3.18±0.02^{b}	3.42±0.08^{a}
	4-Methyl-2-pentanone	4-甲基-2-戊酮	$C_6H_{12}O$	0.18±0.01^{a}	0.06±0.00^{b}	0.06±0.00^{b}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}
	2-Propanone	2-丙酮	C_3H_6O	1.58±0.05^{i}	2.30±0.21^{h}	2.77±0.03^{g}	4.83±0.17^{e}	4.04±0.06^{f}	4.56±0.10^{e}	5.75±0.29^{d}	7.69±0.09^{b}	6.74±0.06^{c}	10.02±0.23^{a}
	2-Butanone	2-丁酮	C_4H_8O	0.02±0.00^{i}	0.14±0.01^{h}	0.87±0.00^{f}	1.62±0.02^{d}	2.59±0.01^{a}	1.43±0.02^{e}	1.60±0.10^{d}	0.78±0.02^{g}	2.31±0.01^{b}	1.86±0.04^{c}
	3-Methyl-2-cyclopenten-1-one	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	C_6H_8O	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.45±0.06^{c}	1.05±0.19^{a}	0.65±0.19^{b}	0.45±0.07^{c}	0.44±0.03^{c}	0.46±0.02^{c}	0.40±0.06^{c}
	Cyclopentanone	环戊酮	C_5H_8O	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.46±0.07^{cd}	0.41±0.02^{d}	0.41±0.04^{d}	0.55±0.04^{b}	0.68±0.05^{a}	0.49±0.04^{bc}	0.40±0.04^{d}
	Acetic acid hexyl ester	乙酸己酯	$C_8H_{16}O_2$	0.24±0.11^{a}	0.07±0.00^{b}	0.07±0.00^{b}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}
	Ethyl caproate	己酸乙酯	$C_8H_{16}O_2$	0.76±0.02^{d}	0.24±0.01^{d}	0.32±0.02^{d}	5.49±0.95^{a}	2.77±0.74^{bc}	2.93±0.32^{bc}	2.55±0.14^{bc}	3.23±0.34^{b}	2.46±0.18^{bc}	2.27±0.05^{c}
	ethyl(E)-2-butenoate	反式-2-丁烯酸乙酯	$C_6H_{10}O_2$	0.80±0.00^{a}	0.19±0.01^{e}	0.13±0.00^{f}	0.24±0.03^{d}	0.15±0.01^{f}	0.20±0.01^{de}	0.26±0.01^{c}	0.39±0.02^{b}	0.28±0.01^{c}	0.28±0.01^{c}
	Acetic acid butyl ester	乙酸丁酯	$C_6H_{12}O_2$	1.37±0.03^{a}	0.19±0.07^{b}	0.10±0.01^{c}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}
	2-Methylbutanoic acid methyl ester	2-甲基丁酸甲酯	$C_6H_{12}O_2$	0.41±0.01^{f}	0.26±0.03^{g}	0.41±0.01^{f}	0.51±0.02^{d}	0.77±0.01^{a}	0.47±0.01^{e}	0.60±0.03^{c}	0.48±0.01^{de}	0.64±0.03^{b}	0.48±0.02^{de}
	Acetic acid propyl ester	乙酸丙酯	$C_5H_{10}O_2$	0.02±0.00^{g}	0.05±0.01^{f}	0.63±0.01^{b}	0.61±0.00^{b}	1.10±0.02^{a}	0.24±0.01^{c}	0.25±0.01^{c}	0.09±0.01^{e}	0.15±0.01^{d}	0.08±0.01^{e}
	2-Methyl butanoic acid ethyl ester	2-甲基丁酸乙酯	$C_7H_{14}O_2$	0.29±0.00^{a}	0.04±0.00^{b}	0.04±0.00^{b}	0.07±0.01^{b}	0.05±0.00^{b}	0.02±0.00^{b}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.00^{b}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.01^{b}
	Butanoic acid ethyl ester	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	4.31±0.11^{a}	0.22±0.09^{b}	0.24±0.00^{b}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}
	Butanoic acid, methyl ester	丁酸甲酯	$C_5H_{10}O_2$	0.52±0.01^{a}	0.05±0.00^{c}	0.12±0.00^{b}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}
	Ethyl 2-methy lpropionate	异丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	0.19±0.00^{a}	0.02±0.00^{g}	0.02±0.00^{g}	0.10±0.01^{b}	0.05±0.00^{c}	0.04±0.01^{def}	0.03±0.00^{ef}	0.04±0.00^{d}	0.03±0.00^{fg}	0.04±0.00^{de}
	Ethyl propanoate	丙酸乙酯	$C_5H_{10}O_2$	1.32±0.04^{a}	0.13±0.01^{c}	0.19±0.01^{b}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}
	Acetic acid ethyl ester	乙酸乙酯	$C_4H_8O_2$	6.42±0.21^{a}	3.74±0.27^{b}	3.11±0.05^{c}	1.48±0.07^{f}	1.24±0.02^{g}	1.41±0.01^{fg}	1.57±0.03^{f}	2.15±0.09^{e}	1.60±0.03^{f}	2.70±0.04^{d}
	Methyl acetate	乙酸甲酯	$C_3H_6O_2$	0.89±0.02^{a}	0.54±0.05^{c}	0.71±0.01^{b}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}
	Ethyl 2-hydroxypropanoate	2-羟基丙酸乙酯	$C_5H_{10}O_3$	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	2.24±0.44^{a}	1.04±0.26^{b}	0.97±0.02^{bc}	0.85±0.13^{bc}	1.01±0.10^{b}	0.65±0.03^{c}	0.67±0.05^{c}
羧酸类	Acetic acid	醋酸	$C_2H_4O_2$	0.98±0.02^{c}	1.49±0.12^{c}	0.38±0.02^{c}	3.48±0.32^{c}	1.71±0.06^{c}	2.52±0.13^{c}	4.34±0.35^{c}	16.31±6.27^{a}	12.26±2.68^{b}	11.08±0.30^{b}
烯萜类	(+)-Limonene	(R)-柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	0.05±0.00^{h}	0.15±0.02^{g}	0.36±0.01^{f}	1.49±0.10^{b}	2.64±0.09^{a}	0.69±0.01^{e}	1.14±0.06^{c}	0.39±0.04^{f}	0.82±0.02^{d}	0.62±0.02^{e}
	alpha-Terpinolene	α-松油烯	$C_{10}H_{16}$	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.48±0.03^{b}	0.76±0.03^{a}	0.21±0.02^{d}	0.29±0.03^{c}	0.19±0.03^{d}	0.29±0.03^{c}	0.21±0.02^{d}
	beta-Ocimene	β-罗勒烯	$C_{10}H_{16}$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.55±0.04^{b}	0.96±0.05^{a}	0.24±0.02^{e}	0.39±0.02^{c}	0.22±0.02^{e}	0.35±0.02^{c}	0.30±0.04^{d}
	beta-Myrcene	β-月桂烯	$C_{10}H_{16}$	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.53±0.03^{b}	1.22±0.03^{a}	0.21±0.02^{d}	0.21±0.01^{d}	0.30±0.07^{c}	0.29±0.03^{c}	0.22±0.03^{d}
	delta-3-Carene	δ-3-蒈烯	$C_{10}H_{16}$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.36±0.02^{b}	0.61±0.01^{a}	0.16±0.01^{e}	0.26±0.03^{c}	0.15±0.02^{e}	0.23±0.02^{d}	0.17±0.01^{e}
其他类	DMF	二甲基甲酰胺	C_3H_7NO	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	0.00±0.00^{e}	2.96±0.65^{a}	1.79±0.21^{b}	1.93±0.24^{b}	2.06±0.14^{b}	2.72±0.05^{a}	2.08±0.21^{b}	2.20±0.14^{b}
	2-Pentyl furan	2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.47±0.01^{a}	0.37±0.02^{b}	0.16±0.00^{e}	0.21±0.01^{d}	0.30±0.04^{c}	0.18±0.02^{e}	0.38±0.01^{b}
	1,2-Dimethylbenzene	邻二甲苯	C_8H_{10}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.00±0.00^{c}	0.07±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.08±0.01^{b}	0.09±0.02^{b}	0.07±0.01^{b}	0.51±0.08^{a}
	1,1-Diethoxy ethane	1,1-二乙氧基乙烷	$C_6H_{14}O_2$	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	0.00±0.00^{f}	1.38±0.18^{b}	0.78±0.04^{e}	0.99±0.01^{d}	1.20±0.02^{c}	1.79±0.03^{a}	1.25±0.03^{c}	1.77±0.04^{a}

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

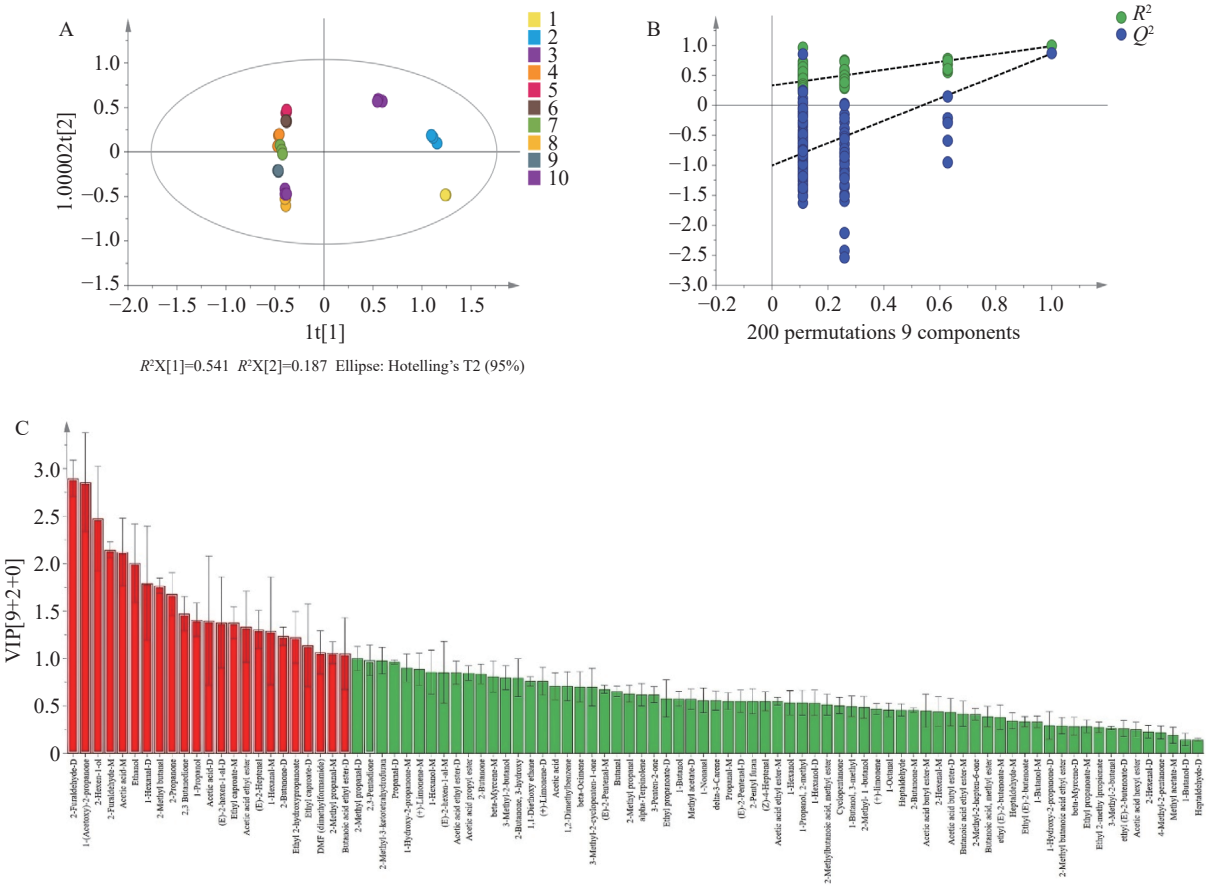


图 5　不同莱阳梨膏挥发性化合物的多元统计分析

Fig.5　Multivariate statistical analysis of volatile compounds in different Laiyang pear paste

注：A 不同莱阳梨膏 OPLS-DA 图；B 置换检验结果图；C 变量投影重要性（VIP）图。

表 3　不同莱阳梨膏中挥发性风味物质的 ROAV

Table 3　ROAV of volatile flavor compounds in different Laiyang pear paste

编号	名称	香气描述	CAS	分子式	阈值（μg/kg）	ROAV									
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1-己醛	青草香、水果香	C66251	$C_6H_{12}O$	0.03	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	2-呋喃醛	焦糖味	C98011	$C_5H_4O_2$	282	–	0.02	0.15	0.20	0.19	0.15	0.14	0.06	0.15	0.06
3	正辛醛	水果香	C124130	$C_8H_{16}O$	0.7	0.04	0.16	0.24	1.11	0.72	0.61	1.09	1.25	1.45	1.12
4	反式-2-己烯醛	果香、青草香	C6728263	$C_6H_{10}O$	17	0.09	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
5	庚醛	青草香、果香	C111717	$C_7H_{14}O$	0.25	0.35	0.71	1.01	2.88	1.54	1.35	2.36	3.17	3.31	2.59
6	2-己烯醛	甜杏仁味、青草香、水果香	C505577	$C_6H_{10}O$	30	–	–	0.01	–	–	–	–	–	–	–
7	2-甲基丁醛	苦杏仁、可可、麦芽香	C96173	$C_5H_{10}O$	4	0.04	0.84	1.59	4.23	2.14	1.89	3.12	3.06	5.85	2.83
8	2-甲基丙醛	坚果气味、香蕉味	C78842	C_4H_8O	1	0.10	1.00	1.52	7.51	4.53	4.02	6.23	4.83	9.91	4.19
9	丙醛	刺激性气味、青草味	C123386	C_3H_6O	10	0.01	0.09	0.16	0.28	0.19	0.19	0.24	0.22	0.47	0.27
10	丁醛	水果香、香蕉味	C123728	C_4H_8O	9	–	–	–	0.20	0.14	0.08	0.15	0.12	0.26	0.13
11	1-壬醛	花香	C124196	$C_9H_{18}O$	49	–	–	–	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
12	2-己烯-1-醇	青草香、果香	C2305217	$C_6H_{12}O$	359.3	0.01	0.05	0.05	–	–	–	–	–	–	–
13	乙醇	酒香	C64175	C_2H_6O	520	–	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14	2,3-戊二酮	黄油味、甜香、果香	C600146	$C_5H_8O_2$	20	–	–	0.08	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
15	2,3-丁二酮	黄油味	C431038	$C_4H_6O_2$	15	0.01	0.16	0.19	0.34	0.14	0.20	0.14	0.21	0.39	0.24
16	2-丁酮	果香	C78933	C_4H_8O	61	–	–	0.02	0.05	0.06	0.02	0.03	0.01	0.07	0.03
17	己酸乙酯	甜香、果香	C123660	$C_8H_{16}O_2$	5	0.02	0.04	0.09	1.88	0.77	0.58	0.61	0.72	0.91	0.48
18	反式-2-丁烯酸乙酯	青草香	C623701	$C_6H_{10}O_2$	0.5	0.26	0.30	0.34	0.81	0.41	0.39	0.63	0.86	1.03	0.58
19	2-甲基丁酸乙酯	甜香、苹果香	C7452791	$C_7H_{14}O_2$	0.35	0.14	0.09	0.15	0.36	0.21	0.07	0.09	0.09	0.17	0.09
20	丁酸乙酯	果香、草莓香、青草香	C105544	$C_6H_{12}O_2$	0.1	6.98	1.73	3.19	–	–	–	–	–	–	–

续表 3

编号	名称	香气描述	CAS	分子式	阈值（μg/kg）	ROAV									
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	丁酸甲酯	苹果、甜香、菠萝味	C623427	$C_5H_{10}O_2$	1	0.08	0.04	0.16	−	−	−	−	−	−	−
22	异丁酸乙酯	甜香、果香	C97621	$C_6H_{12}O_2$	0.1	0.31	0.15	0.23	1.79	0.74	0.36	0.41	0.48	0.60	0.40
23	丙酸乙酯	果香	C105373	$C_5H_{10}O_2$	10	0.02	0.01	0.03	−	−	−	−	−	−	−
24	乙酸甲酯	果香、甜香	C79209	$C_3H_6O_2$	2	0.07	0.21	0.47	−	−	−	−	−	−	−
25	(R)-柠檬烯	清新果香、柑橘香	C138863	$C_{10}H_{16}$	38	−	−	0.01	0.07	0.10	0.02	0.04	0.01	0.04	0.02
26	*α*-松油烯	柑橘香、柠檬香	C586629	$C_{10}H_{16}$	80	−	−	−	0.01	0.01	−	−	−	0.01	−
27	*β*-月桂烯	草本清香	C123353	$C_{10}H_{16}$	15	−	−	−	0.06	0.11	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
28	2-戊基呋喃	果香、泥土味	C3777693	$C_9H_{14}O$	5.8	−	−	−	0.14	0.09	0.03	0.04	0.06	0.06	0.07
29	1,1-二乙氧基乙烷	水果香	C105577	$C_6H_{14}O_2$	40	−	−	−	0.06	0.03	0.02	0.04	0.05	0.06	0.05

注: “−”表示未检出; 嗅觉阈值参考[32−33], 嗅觉感官描述参考[13,21,24−25,34−35], 部分风味描述来自http://www.flavornet.org/。

合物包括 1-己醛、正辛醛、庚醛、2-甲基丁醛、2-甲基丙醛、己酸乙酯、丁酸乙酯、异丁酸乙酯, 结合 VIP 值结果分析得出, 2-甲基丁醛、2-甲基丙醛、己酸乙酯、丁酸乙酯为关键气味标志物。梨果实中大多数的直链酯、醛和醇类物质由脂肪代谢产生, 支链脂肪族醛类物质呈现出花香、甜香及水果香[23]。通过冷冻干燥浓缩方法制作的梨膏中丁酸乙酯含量显著高于其余 9 组, 酯类物质含量与水果香气浓度有关, 含量越高香气越浓郁[31], 表明在制作梨膏过程中减少高温影响, 可以更好保留梨膏原料中梨果实原有香气。0.1≤ROAV<1 的挥发性化合物具有修饰作用, 其中 2-呋喃醛成分的 ROAV 值在冷冻干燥浓缩、减压浓缩和常压熬煮样品中逐步提升明显, 此物质为梨膏贡献焦糖味香气, 不同品类的采样梨膏所含风味物质种类或浓度不同, 表现出采样梨膏具有独特的风味特点。

3 结论

本实验以莱阳梨为原材料, 通过冷冻干燥浓缩、减压浓缩和常压熬煮方法制备梨膏并与采样莱阳梨膏对流变学特性、挥发性成分进行了分析, 结果表明莱阳梨膏为非牛顿假塑性流体且剪切稀化。通过分析 GC-IMS 风味成分图谱, 定性检测出 10 种莱阳梨膏中共存的 61 种不同挥发性风味物质, 通过结合 OPLS-DA 和 ROAV 筛选出 2-甲基丁醛、2-甲基丙醛、己酸乙酯、丁酸乙酯为莱阳梨膏关键气味标志物。其中, 通过冷冻干燥浓缩方式制备的莱阳梨膏在所有样品中流变学特性表现良好, 没有表现出过度稀薄或黏稠的现象, 并较大程度保留了梨果实原有的风味特点, 该研究为梨膏类食品加工与品质分析提供理论与技术参考。

© 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] 桂怡, 徐丽华, 林永强. HPLC 法同时测定莱阳梨清膏中 3 个咖啡酰奎宁酸类成分的含量[J]. 药物分析杂志, 2012, 32(9): 1648−1650. [GUI Y, XU L H, LIN Y Q. HPLC method for simultaneous determination of three caffeoylquinic acids in Laiyang pear clear paste[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2012, 32(9): 1648−1650.]

[2] 张莹, 徐家玉, 胡红菊, 等. 不同品种梨膏营养成分的综合分析与评价研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 123−133. [ZHANG Y, XU J L, HU H J, et al. Study on comprehensive analysis and evaluation of nutritional components of different kinds of pear pastes[J]. Storage and Process, 2022, 47(8): 63−68.]

[3] 李月, 赵江丽, 张笑莹, 等. 基于 Z-score 评价模型优化梨膏护色工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 210−217. [LI Y, ZHAO J L, ZHANG X Y, et al. Optimization of color protection technology of pear paste based on Z-score evaluation model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 210−217.]

[4] 董雪君, 陈义伦. 加工过程对莱阳梨清膏总酚及抗氧化能力的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 115−119. [DONG X J, CHEN Y L. Effect of working process on total polyphenol and antioxidant capacity of Laiyang pear clear paste[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 115−119.]

[5] 李月, 赵江丽, 张笑莹, 等. 梨膏的流变学特性及其影响因素[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 259−267. [LI Y, ZHAO J L, ZHANG X Y, et al. Rheological properties of pear paste and its influencing factors[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(16): 259−267.]

[6] WANG Yang, TONG Wei, WANG Wenhui, et al. Identification of volatile organic compounds and analysis of aroma characteristics in ten pear syrups[J]. Foods, 2024, 13(20): 3223.

[7] 魏珊珊, 李娟, 刘贵珊. 香水梨香气成分的萃取条件优化及GC-MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(11): 194−200. [WEI S S, LI J, LIU G S. HS-SPME-GC-MS analysis of Xiangshui pear aroma components[J]. Food Research and Development, 2023, 44(11): 194−200.]

[8] 李月, 张笑莹, 赵江丽, 等. 不同复合安梨膏品质及抗氧化性能的比较研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(9): 153−160. [LI Y, ZHANG X Y, ZHAO J L, et al. Comparative study on the quality and antioxidant activity of different compound Anli pear pastes[J]. China Food Additives, 2023, 34(9): 153−160.]

[9] GABSI K, TRIGUI M, BARRINGTON S, et al. Evaluation of rheological properties of date syrup[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 165−172.

[10] 侯燕杰, 郭玉蓉, 牛鹏飞. 仙人掌果果汁的流变学特性[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(12): 5. [HOU Y J, GUO Y R, NIU P

F. Rheological properties of cactus fruit juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(12): 5.]
[11] YAO Lingyun, MO Yifan, CHEN Da, et al. Characterization of key aroma compounds in Xinjiang dried figs (*Ficus carica* L.) by GC-MS, GC-olfactometry, odor activity values, and sensory analyses[J]. Lwt, 2021, 150: 111982.
[12] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法："ROAV"法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[13] 王大琴. 不同加工工艺对梨膏品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025. [WANG Daqin. Research on the impact of different processing techniques on the quality of pear paste[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2025.]
[14] ZHENG Chao, LUO Yunxiao, YI Danhui, et al. The texture and rheology properties of k-carrageenan and *Artemisia* sphaerocephdala krasch gum composite gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 309: 143061.
[15] SONAWANE A, PATHAK S, PRADHAN R C. Effect of processing temperature on dynamic rheological properties and color degradation kinetics of bael fruit pulp[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5596−5602.
[16] WANG Q, ESPERT M, HERNÁNDEZ M J, et al. Effect of cellulose ether emulsion and oleogel as healthy fat alternatives in cream cheese. Linear and nonlinear rheology, texture and sensory properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109740.
[17] 秦贯丰, 丁中祥, 原姣姣, 等 苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 102−109. [QIN G F, DING Z X, YUAN J J, et al. Comparative experimental study on freeze concentration and vacuum evaporation concentration of apple juice[J]. Food Science, 2020, 41(7): 102−109.]
[18] BASU S, SINGHA S.Advances in food rheology and its applications[M].2th ed.Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2023: 385−411.
[19] 张淇云, 谢晶, 邵则淮, 等. 大豆分离蛋白美拉德反应研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 196−202. [ZHANG Q Y, XIE J, SHAO Z H, et al. Research progress on maillard reaction of soybean protein isolate[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10): 196−202.]
[20] QIU Zhichang, ZHANG Mingjie, LI Lingyu, et al. Effect of blend oil on the volatile aroma profile and storage quality of garlic paste[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131160.
[21] 赵竞伊, 张鹏, 曹森, 等. 不同品种番茄采后品质和挥发性物质差异分析[J]. 食品工业科技, 2024, 5(15): 274−282. [ZHAO J Y, ZHANG P, CAO S, et al. Analysis of postharvest quality and volatile substancesof different tomato varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 5(15): 274−282.]
[22] 何婉琳, 施露, 林梦桦, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析不同产地秋月梨品质差异[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 118−125. [HE W L, SHI L, LIN M H, et al. Quality analysis of 'Akizuki' pear fruit (*Pyrus pyrifolia*) from different geographical origins by gas ghromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(5): 118−125.]
[23] 莫皓然, 黄名正, 张群, 等. 顶空固相微萃取结合溶剂辅助风味蒸发分析无籽刺梨挥发性成分及其呈香贡献[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 289−297. [MO H R, HUANG M Z, ZHANG Q, et al. Analysis the volatiles and its aroma contribution in rosa sterilis by HS-SPME and LLE-SAFE[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 289−297.]
[24] CHEN Huawei, ZHANG Zhenwen, ZHANG Lijian, et al. Comparative analysis of the evolution of green leaf volatiles and aroma in six *Vitis vinifera* L. cultivars during berry maturation in the Chinese Loess Plateau Region[J]. Foods, 2024, 13(8): 1207.
[25] 王鑫. 不同梨品种果实香气物质组成及特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [WANG Xin. Study on the composition and characteristics of aroma substances in fruits of different pear varieties[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
[26] 李玉真. 反应条件对葡萄糖-甘氨酸美拉德反应体系中糠醛类化合物形成的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 85−92. [LI Y Z. Effects of reaction conditions on the formation of furfural compounds in maillard reaction system of glucose-glycine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 85−92.]
[27] 鲁翀. 云南小粒咖啡鲜果发酵时间对咖啡风味和功能影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024. [LU Chong. Study on the effects of fermentation time on coffee flavor and functionality of fresh fruits of *Coffea arabica* in Yunnan[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.]
[28] 张厅, 王欣颖, 李黔艳, 等. 基于 GC-IMS 分析四种刺梨发酵酒中挥发性成分差异[J]. 中国酿造, 2024, 43(11): 242−248. [ZHANG T, WANG X Y, LI Q Y, et al. Differences of volatile components in four kinds of fermented *Rosa roxburghii* wines based on GC-IMS analysis[J]. China Brewing, 2024, 43(11): 242−248.]
[29] 庞钶靖, 万国超, 刘振平, 等. 气相色谱-离子迁移谱结合化学计量学分析对新会陈皮的鉴别[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 275−281. [PANG K J, WAN G C, LIU Z P, et al. Identification of Xinhui Chenpi (*Citri reticulatae* pericarpium) by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometric analysis[J]. Food Science, 2024, 45(13): 275−281.]
[30] 李扬, 李妍, 李栋, 等. 基于 ROAV 和嗅闻技术分析乳脂的关键风味化合物[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 262−267. [LI Y, LI Y, LI D, et al. Analysis of key flavor compounds in dairy fat products using relative odor activity value and olfactometry[J]. Food Science, 2023, 44(6): 262−267.]
[31] MAKKUMRAI W, ANTHON G E, SIVERTSEN H, et al. Effect of ethylene and temperature conditioning on sensory attributes and chemical composition of 'Bartlett' pears[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 97: 44−61.
[32] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018. [LEO VAN Hemmet. Compilation of olfactory thresholds of compounds[M]. Beijing: Science Press, 2018.]
[33] 齐李歌, 杨宪东, 高振鹏, 等. 陕西特色腊子肉特征香气物质解析[J]. 肉类研究, 2021, 35(2): 25−30. [QI L G, YANG X D, GAO Z P, et al. Analysis of characteristic aroma substances of Shaanxi featured diced meat[J]. Meat Research, 2021, 35(2): 25−30.]
[34] 李国鹏. 中国梨果实挥发性物质鉴定及酯类物质生物合成相关基因表达的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. [LI Guopeng. Identification of volatile compounds in chinese pear fruits and study on the expression of genes related to ester biosynthesis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.]
[35] 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 B Y, ZHENG P F, LI X X, 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.]