

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240328002

# 超高效液相色谱-四极杆-飞行时间-高分辨质谱法 分析 6 种李果实中的代谢物差异性

李红洲<sup>1,2</sup>, 国果<sup>1,3\*</sup>, 李博岩<sup>1\*</sup>, 梁桂娟<sup>2</sup>, 李志远<sup>4</sup>

(1. 贵州医科大学公共卫生与健康学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省产品质量检验检测院, 贵阳 550014;  
3. 贵州医科大学转化医学研究中心, 贵阳 550025; 4. 上海爱博才思分析仪器贸易有限公司, 北京 100015)

**摘要:** **目的** 采用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间高分辨质谱法分析 6 种李果实中的代谢物差异。**方法** 使用天然产物高分辨二级谱库、代谢物高分辨二级谱库和相关数据库等对不同李果实样品中的代谢产物进行数据分析, 利用峰面积归一化法计算各化学成分的含量, 采用主成分分析方法、偏最小二乘法判别分析和方差分析方法, 分析不同李果实样品中代谢产物的差异。**结果** 共分析鉴定了 130 个化学成分, 其中包括 28 个黄酮类、25 个脂肪酸、18 个萜烯类、11 个核苷酸、10 个酚酸、9 个香豆素类、8 个含氮化合物、6 个酚类以及 15 个其他类化合物; 在所鉴定的 130 个化合物中, 有 123 个化合物对每组李果实均值间的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ); 6 组不同品种李果实的数据间具备很好的区分度, 贡献最大的化合物共有 32 个。**结论** 6 个品种李果实存在相同种类的代谢产物, 各代谢产物在不同品种李果实中的相对含量存在显著差异性, 为李果品种选育、区分以及产地溯源等提供参考。

**关键词:** 李果实; 超高效液相色谱-四极杆-飞行时间-高分辨质谱法; 代谢物; 差异性分析

## Analysis of differences of metabolites in 6 kinds of plum fruit by ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight high resolution mass spectrometry

LI Hong-Zhou<sup>1,2</sup>, GUO Guo<sup>1,3\*</sup>, LI Bo-Yan<sup>1\*</sup>, LIANG Gui-Juan<sup>2</sup>, LI Zhi-Yuan<sup>4</sup>

(1. School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; 2. Institution of Inspection and Testing Product Quality of Guizhou Province, Guiyang 550014, China; 3. Translational Medicine Research Center of Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; 4. Shanghai AB SCIEX Analytical Instrument Trading Co., Ltd., Beijing 100015, China)

**ABSTRACT: Objective** To analyze the difference of metabolites in 6 kinds of plum fruit by ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight high resolution mass spectrometry. **Methods** High resolution secondary spectrum of natural products, high resolution secondary spectrum of metabolites and related databases were used to analyze the data of metabolites in different plum fruit samples. Peak area normalization method was used to calculate the relative content of each chemical component. Principal component analysis, partial least square

\*通信作者: 国果, 教授, 主要研究方向为食品卫生。E-mail: guoguo@163.com

李博岩, 教授, 主要研究方向为食品营养与多组学。E-mail: Boyan\_Li@163.com

\*Corresponding author: GUO Guo, Professor, Translational Medicine Research Center of Guizhou Medical University, Dongqing Road, Huaxi District, Guiyang 550025, China. E-mail: guoguo@163.com

LI Bo-Yan, Professor, School of Public Health, Guizhou Medical University, Dongqing Road, Huaxi District, Guiyang 550025, China. E-mail: guoguo@163.com

discriminant analysis and variance analysis were used to analyze the differences of metabolites in different plum fruit samples. **Results** A total of 130 compounds were identified, including 28 flavonoids, 25 fatty acids, 18 terpenes, 11 nucleotides, 10 phenolic acids, 9 coumarins, 8 nitrogen compounds, 6 phenols and 15 other compounds. Among the 130 compounds identified, 123 compounds showed statistically significant differences between the mean values of plum fruit groups ( $P < 0.05$ ). There was a good degree of differentiation among the 6 groups of different varieties of plum fruit, and a total of 32 compounds with the greatest contribution. **Conclusion** The same metabolites are found in 6 varieties of plum fruit, and the relative content of metabolites in different kinds of plum fruit are significantly different, which provides reference for breeding, distinguishing and origin tracing of plum fruit varieties.

**KEY WORDS:** plum fruit; ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight high resolution mass spectrometry; metabolite; difference analysis

## 0 引言

李子(*Prunus salicina* Lindl.)果实营养价值很高,含多种矿物质、有机酸、多酚类、维生素和多种人体所需的氨基酸等成分<sup>[1-6]</sup>。李果实有很高的医药应用价值<sup>[7-13]</sup>,研究表明李果实具有抗炎活性<sup>[14]</sup>,可以提高人们的血浆及尿液的抗氧化活性<sup>[15-17]</sup>、降低血压<sup>[15]</sup>、减少氧化应激、改善血液血栓特性<sup>[18-19]</sup>、降低血小板聚集<sup>[19]</sup>等,喂食高含量酚类物质的李汁能显著改善老鼠的认知<sup>[20]</sup>等。由于李属品种及变种类型十分丰富,品种间遗传多样性较高<sup>[21]</sup>,不同李品种间的植物化学成分和抗氧化成分具有较高的变异性<sup>[22-23]</sup>,因此,开展基于不同品种李果实中的代谢产物的测定分析对李果实品质评价研究具有重要的实用价值。

超高效液相色谱-四极杆-飞行时间-高分辨质谱(ultra performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight high resolution mass spectrometry, UPLC-Q-TOF-HRMS)技术具有快速便捷、准确、高灵敏度和高分辨率等优势,可进行靶向物和非靶向物的高分辨率筛选,广泛应用于果蔬中农药残留筛查鉴定<sup>[24-25]</sup>、营养成分及生物活性成分鉴定<sup>[26-28]</sup>、蜂蜜的真伪鉴别<sup>[29]</sup>等。目前,但对于李果实中化学成分的的系统性分析以及不同品种李果实中的代谢物差异性分析暂未见文献报道。因此,本研究利用 UPLC-Q-TOF-HRMS 技术,分析蜂糖李、珠宝李、红李、江安李、青红脆李和酥李等 6 个不同品种李果实中的化学成分,分析比较不同品种李果实代谢产物的差异性,揭示李果实中的主要化学成分与优越性化学组分,为李果实营养价值较高、经济发展前景较好提供基础资料,为李果品种选育及种植等相关领域的进一步研究提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

李果样品:选取无病虫害、无机械损伤、大小均匀、

成熟度一致的健康李果实,洗净自然晾干后去除柄、核等非食用部分,用刀式研磨仪匀浆处理后,转移至密封袋中,加贴样品标签和编号,置于 $-20^{\circ}\text{C}$ 保存备用。李果实样品详细信息如表 1 所示。

表 1 李果实样品信息表  
Table 1 Plum samples informations

分组	样品名称	产地
1	珠宝李	智利
2	红李	贵州省贵阳市
3	蜂糖李	贵州省镇宁县六马镇
4	江安李	四川省宜宾市
5	青红脆李	云南省昭通市
6	酥李	贵州省贵阳市

甲醇、乙腈、甲酸、乙酸铵(色谱纯,德国默克公司);超纯水(自制)。

### 1.2 仪器设备

X500R QTOF 超高效液相色谱-四极杆-飞行时间-高分辨质谱系统(上海 SCIEX 分析仪器贸易有限公司); Multi Reax 振荡器(德国 Heidolph 公司); ME204E/02 电子天平(精度 0.0001 g,瑞士梅特勒-托利多国际贸易有限公司); VCK-25R 高速冷冻离心机(湖南迈克实验仪器有限公司); DW-25L400 低温冰箱(山东澳柯玛集团); Milli-Q Academic 超纯水系统(密理博中国有限公司); HM300 刀式研磨仪(北京格瑞德曼仪器设备有限公司);  $\text{C}_{18}$  色谱柱(100 mm  $\times$  2.1 mm, 1.7  $\mu\text{m}$ )(美国安捷伦科技有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品前处理

取李果实样品 10.00 g 置于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 的 80% 甲醇-水溶液(1/1),置于振荡器中振荡提取 10 min,  $4^{\circ}\text{C}$  条件下 10000 r/min 离心 10 min,取上清液,用 0.22  $\mu\text{m}$  有机微孔滤膜过滤得处理液,待测。每个样品做 3 个重复实验。

空白实验:除不称取李果实样品外,其余按相同步骤操作。

质控样品: 取各李果实样品的 80% 甲醇-水溶液提取物的处理液, 等体积混合制备质控样品。

### 1.3.2 液相色谱检测条件

C<sub>18</sub> 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.7 μm); 柱温: 40°C; 进样器温度: 8°C; 进样量: 5 μL; 流动相 A: 3% 乙腈-水溶液(含 2.0 mmol/L 乙酸铵和 0.05% 甲酸); 流动相 B: 50% 甲醇-乙腈(V/V); 流速 0.3 mL/min; 梯度洗脱: 0~2.0 min, 100% A; 2.0~5.0 min, 100% A→60% A; 5.0~17.0 min, 60% A→98% A; 17.0~22.0 min, 98% A; 22.1~25.0 min, 100% A。

### 1.3.3 高分辨质谱条件

采用信息依赖扫描(information dependent acquisition, IDA)模式, 分别采集每个样品的正负两种离子模式的 UPLC-Q-TOF-HRMS 数据。离子源参数条件: 气帘气: 35 psi; 雾化气: 50 psi; 辅助加热气: 50 psi; 喷雾电压: +5500 V/-4500 V; 加热温度: 500°C; 去簇电压: +60 V/-60 V; 碰撞能量: (40±20) V/(-40±20) V; TOF MS 扫描范围: *m/z* 60~1200 Da; TOF MS 累积时间: 0.12 s; TOF MS/MS 扫描范围: *m/z* 40~1200 Da; TOF MS/MS 累积时间: 30 ms。

## 1.4 数据处理

使用 SCIEX 的天然产物高分辨二级谱库(Natural products 2.1)、代谢物高分辨二级谱库(Metabolite 2.0)和全球天然产物分子网络在线公共数据库对不同李果实样品中的代谢产物进行定性, 采用靶向搜库和非靶向未知物的发现两种方式对化合物进行鉴定; 利用 SCIEX OS 软件处理质谱数据, 对各化合物的提取离子流图进行积分并计算其峰面积, 采用峰面积归一化法计算各化合物的相对含量。利用 SPSS 25、Origin 2021 软件对数据进行统计处理和相关性分析, Duncan 多重比较方法进行方差分析; 利用主成分分析(principal component analysis, PCA)方法、偏最小二乘法判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)和方差分析(analysis of variance, ANOVA)等方法, 分析不同李果实样品中代谢产物的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 李果实化学成分的鉴定

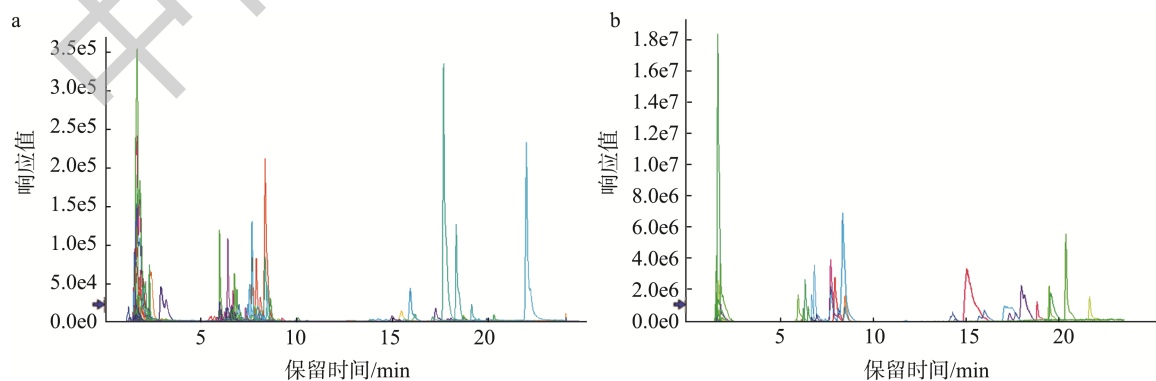
李果实中化学成分使用 UPLC-Q-TOF-HRMS 分析, 通过靶向搜库和非靶向未知物发现两种方式进行化合物的鉴定; 李果实样品在正负离子模式下的 UPLC-Q-TOF-HRMS 总离子流图, 如图 1 所示。

实验结果表明, 从珠宝李、蜂糖李、江安李、青红脆李、红李和酥李 6 个不同品种李果实中共鉴定了 130 个化学成分, 其中包括 28 个黄酮类、25 个脂肪酸、18 个萜烯类、11 个核苷酸、10 个酚酸、9 个香豆素类、8 个含氮化合物、6 个酚类以及 15 个其他类化合物。利用面积归一化法对 130 个组分进行相对定量分析, 得出各类别化合物在不同李果实中的占比(见图 2)。结果显示, 珠宝李果实中以黄酮类、萜烯类和脂肪酸为主, 其相对含量占所鉴定化合物的 90%; 红李果实中酚酸类化合物相对含量最高, 占比为 74%; 蜂糖李、江安李、青红脆李和酥李果实中黄酮类化合物相对含量占比最高。

### 2.2 李果实代谢产物测定结果

#### 2.2.1 李果实中黄酮类组分测定结果

总黄酮广泛存在于植物界, 是许多中草药的有效成分, 具有多种生物活性<sup>[30]</sup>。对李果实中黄酮类组分进行鉴定分析, 共发现 28 个黄酮类化合物, 如表 2 所示, 28 个黄酮类化合物组分在不同品种李果实中的相对含量存在显著差异( $P<0.05$ )。6 种李果实相对含量最高的均为槲皮素-3-*D*-木糖甙, 达到 112.42% 以上, 其中红李果实的槲皮素-3-*D*-木糖甙相对含量达到 345.08%; 而其他黄酮类物质在各种李果实中的相对含量排序有所差异, 相对含量靠前的分别为珠宝李芦丁 56.80%、槲皮素-3-*O*-豌豆苷为 35.12%、槲皮素为 26.04%、桑黄素水合物为 26.04% 等, 红李排名靠前的有芦丁为 108.49%、栲精-3-*O*-β-*D*-吡喃葡萄糖基-6"-



注: a: 正离子模式; b: 负离子模式。

图1 李果实样品的总离子流图

Fig.1 Total ion chromatogram of plum fruit sample

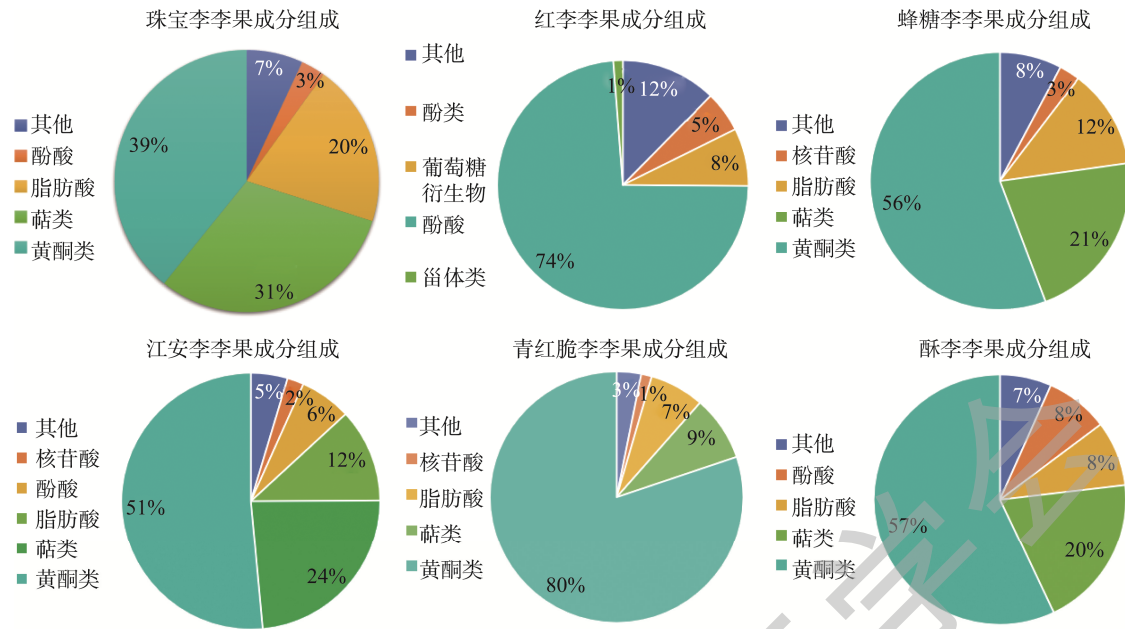


图2 不同品种李果实中的成分组成

Fig.2 Components of different varieties of plum fruit

表 2 李果实中黄酮类化合物组分测定结果(相对峰面积, %)

Table 2 Analysis results of flavonoids in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
山奈酚	1.56	[M+H] <sup>+</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>	0.86±0.00 <sup>c</sup>	0.56±0.00 <sup>c</sup>	0.28±0.00 <sup>b</sup>	0.36±0.00 <sup>d</sup>	0.32±0.00 <sup>e</sup>
紫杉叶素	6.84	[M-H] <sup>-</sup>	0.37±0.00 <sup>b</sup>	0.17±0.00 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.63±0.00 <sup>c</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>
原花青素 B <sub>2</sub>	7.45	[M-H] <sup>-</sup>	0.78±0.00 <sup>a</sup>	0.91±0.00 <sup>a</sup>	31.14±0.07 <sup>b</sup>	63.67±0.46 <sup>c</sup>	38.69±0.26 <sup>c</sup>	46.54±0.19 <sup>e</sup>
忍冬苷	7.49	[M-H] <sup>-</sup>	0.76±0.00 <sup>a</sup>	19.77±0.37 <sup>c</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	14.65±0.01 <sup>b</sup>	0.61±0.00 <sup>a</sup>
槲皮素-3-D-木糖甙	7.95	[M+H] <sup>+</sup>	144.52±3.76 <sup>a</sup>	345.08±3.65 <sup>f</sup>	215.58±8.67 <sup>c</sup>	112.42±1.51 <sup>b</sup>	265.58±3.54 <sup>c</sup>	160.06±4.10 <sup>d</sup>
山奈酚-7-O-新橙皮糖苷	8.07	[M+H] <sup>+</sup>	7.41±0.00 <sup>a</sup>	26.09±0.12 <sup>d</sup>	53.98±0.43 <sup>c</sup>	56.10±0.48 <sup>f</sup>	12.95±0.03 <sup>c</sup>	12.44±0.00 <sup>b</sup>
白前苷 B	8.12	[M-H] <sup>-</sup>	9.33±0.10 <sup>a</sup>	17.31±0.99 <sup>e</sup>	21.73±2.02 <sup>b</sup>	16.32±1.83 <sup>b</sup>	28.95±3.38 <sup>d</sup>	16.59±1.40 <sup>e</sup>
草质素苷	8.37	[M-H] <sup>-</sup>	9.31±0.38 <sup>a</sup>	18.23±4.47 <sup>c</sup>	22.98±8.07 <sup>b</sup>	17.45±6.03 <sup>b</sup>	35.60±6.12 <sup>d</sup>	17.70±5.35 <sup>e</sup>
芦丁	8.45	[M-H] <sup>-</sup>	56.80±0.12 <sup>a</sup>	108.49±1.42 <sup>c</sup>	31.32±1.99 <sup>a</sup>	53.09±0.65 <sup>a</sup>	93.15±0.93 <sup>c</sup>	79.16±1.09 <sup>b</sup>
槲皮苷	8.75	[M-H] <sup>-</sup>	9.68±0.12 <sup>a</sup>	17.72±2.96 <sup>c</sup>	22.01±4.05 <sup>b</sup>	16.10±1.52 <sup>b</sup>	29.27±6.50 <sup>d</sup>	16.59±1.80 <sup>e</sup>
桑黄素水合物	8.79	[M+H] <sup>+</sup>	26.04±0.04 <sup>a</sup>	20.54±3.79 <sup>c</sup>	13.75±1.47 <sup>c</sup>	23.86±0.12 <sup>b</sup>	25.96±4.47 <sup>c</sup>	15.64±1.35 <sup>d</sup>
金丝桃苷	8.81	[M-H] <sup>-</sup>	14.44±0.20 <sup>ab</sup>	22.94±8.04 <sup>d</sup>	14.53±2.96 <sup>b</sup>	11.06±0.02 <sup>a</sup>	32.52±0.07 <sup>c</sup>	25.59±0.10 <sup>e</sup>
异槲皮苷	8.85	[M-H] <sup>-</sup>	9.64±0.00 <sup>ab</sup>	21.89±3.78 <sup>d</sup>	14.03±1.71 <sup>b</sup>	11.69±0.80 <sup>a</sup>	34.70±8.56 <sup>c</sup>	27.31±5.29 <sup>e</sup>
茨菲醇-3-O-芸香糖苷	9.04	[M-H] <sup>-</sup>	0.76±0.00 <sup>a</sup>	19.77±0.37 <sup>c</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	14.65±0.01 <sup>b</sup>	0.61±0.00 <sup>a</sup>
阿福豆苷	9.73	[M-H] <sup>-</sup>	0.28±0.00 <sup>a</sup>	0.70±0.00 <sup>c</sup>	0.93±0.00 <sup>b</sup>	1.36±0.00 <sup>d</sup>	1.51±0.00 <sup>f</sup>	1.42±0.00 <sup>e</sup>
槲皮素	14.21	[M+H] <sup>+</sup>	26.04±0.04 <sup>a</sup>	21.24±6.31 <sup>c</sup>	14.41±3.15 <sup>c</sup>	23.86±0.12 <sup>b</sup>	24.39±0.06 <sup>c</sup>	14.81±0.04 <sup>d</sup>
柚皮素	14.21	[M+H] <sup>+</sup>	0.25±0.00 <sup>a</sup>	0.37±0.00 <sup>ab</sup>	0.59±0.01 <sup>ab</sup>	0.70±0.00 <sup>b</sup>	0.78±0.01 <sup>c</sup>	0.55±0.00 <sup>b</sup>
栝精-3-O-β-D-吡喃葡萄糖基-6"-乙酸盐	16.71	[M+H] <sup>+</sup>	21.34±0.01 <sup>ab</sup>	48.76±0.24 <sup>d</sup>	21.58±0.03 <sup>b</sup>	9.34±0.01 <sup>a</sup>	82.57±0.43 <sup>c</sup>	28.03±0.06 <sup>e</sup>
异鼠李素	16.75	[M+H] <sup>+</sup>	0.59±0.00 <sup>c</sup>	0.22±0.00 <sup>c</sup>	0.29±0.00 <sup>a</sup>	0.27±0.00 <sup>b</sup>	0.20±0.00 <sup>c</sup>	0.32±0.00 <sup>d</sup>
水仙苷	17.84	[M-H] <sup>-</sup>	1.67±0.01 <sup>d</sup>	0.09±0.00 <sup>b</sup>	0.09±0.00 <sup>a</sup>	0.18±0.00 <sup>b</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.32±0.00 <sup>e</sup>
异鼠李素-3-O-新橙皮糖苷	17.91	[M-H] <sup>-</sup>	1.77±0.02 <sup>d</sup>	0.09±0.00 <sup>b</sup>	0.08±0.00 <sup>a</sup>	0.19±0.00 <sup>b</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.34±0.00 <sup>e</sup>

表 2(续)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
槲皮素 3-O-槐糖	18.03	[M-H] <sup>-</sup>	2.62±0.00 <sup>bc</sup>	0.95±0.00 <sup>b</sup>	2.13±0.00 <sup>c</sup>	2.34±0.00 <sup>d</sup>	0.57±0.00 <sup>a</sup>	0.59±0.00 <sup>a</sup>
槲皮素-3-O-豌豆苷	18.12	[M-H] <sup>-</sup>	35.12±0.07 <sup>d</sup>	0.96±0.00 <sup>a</sup>	39.60±0.84 <sup>e</sup>	39.22±0.19 <sup>f</sup>	4.33±0.00 <sup>b</sup>	7.21±0.01 <sup>c</sup>
水仙苷	20.41	[M+H] <sup>+</sup>	1.49±0.00 <sup>b</sup>	18.07±0.07 <sup>c</sup>	0.34±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>ab</sup>	0.42±0.00 <sup>ab</sup>	0.25±0.00 <sup>a</sup>
表儿茶素	21.62	[M-H] <sup>-</sup>	0.45±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.02 <sup>a</sup>	8.94±0.02 <sup>c</sup>	26.20±0.01 <sup>d</sup>	2.60±0.00 <sup>b</sup>	34.46±0.07 <sup>c</sup>
(+)-儿茶素	22.09	[M-H] <sup>-</sup>	0.42±0.00 <sup>a</sup>	0.85±0.01 <sup>a</sup>	8.94±0.02 <sup>ab</sup>	26.46±0.04 <sup>b</sup>	22.47±0.06 <sup>c</sup>	34.46±0.07 <sup>c</sup>
原花青素 C <sub>1</sub>	23.22	[M-H] <sup>-</sup>	0.42±0.00 <sup>a</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	10.16±0.43 <sup>b</sup>	21.27±0.04 <sup>d</sup>	19.59±0.11 <sup>c</sup>	8.53±0.02 <sup>c</sup>
槲皮素 3-O-芸香糖苷	23.57	[M+H] <sup>+</sup>	10.16±0.00 <sup>b</sup>	19.86±0.09 <sup>f</sup>	5.15±0.02 <sup>a</sup>	7.21±0.01 <sup>c</sup>	15.11±0.02 <sup>c</sup>	12.94±0.03 <sup>d</sup>

注: 同行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

乙酸盐为 48.76%、山柰酚-7-O-新橙皮糖苷为 26.09%等, 蜂糖李排名靠前的有山柰酚-7-O-新橙皮糖苷为 53.98%、槲皮素-3-O-豌豆苷为 39.60%、芦丁为 31.32%等, 江安李排名靠前的有原花青素 B<sub>2</sub> 为 63.67%、山柰酚-7-O-新橙皮糖苷为 56.10%、芦丁为 53.09%等, 青红脆李排名靠前的有芦丁为 93.15%、栲精-3-O-β-D-吡喃葡萄糖基-6''-乙酸盐为 82.57%、原花青素 B<sub>2</sub> 为 38.69%等, 酥李排名靠前的有芦丁为 79.16%、原花青素 B<sub>2</sub> 为 46.54%、(+)-儿茶素为

34.46%和表儿茶素为 34.46%等。

### 2.2.2 李果实中脂肪酸组分测定结果

如表 3 所示, 对李果实中的脂肪酸组分进行鉴定分析, 共发现 25 个脂肪酸, 包括硬脂酸、月桂酸等 5 个饱和脂肪酸以及十二烷基苯磺酸、α-亚麻酸、亚油酸等 20 个不饱和脂肪酸。结果显示, 李果实中相对含量最高的饱和脂肪酸是硬脂酸, 其中江安李的硬脂酸相对含量达到 45.66%; 不饱和脂肪酸相对含量较靠前的主要有十二烷基苯磺酸、亚油酸、α-亚麻酸等,

表 3 李果实中脂肪酸测定结果(相对峰面积, %)  
Table 3 Analysis results of fatty acids in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
十七烷酸	1.34	[M-H] <sup>-</sup>	0.79±0.00 <sup>ab</sup>	0.17±0.00 <sup>a</sup>	0.35±0.00 <sup>ab</sup>	0.35±0.00 <sup>ab</sup>	0.17±0.00 <sup>ab</sup>	0.38±0.00 <sup>ab</sup>
亚油酸甲酯	1.55	[M+H] <sup>+</sup>	0.29±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	0.76±0.05 <sup>a</sup>	0.25±0.00 <sup>a</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>a</sup>
6-氨基己酸	1.55	[M-H] <sup>-</sup>	12.22±0.01 <sup>c</sup>	0.35±0.00 <sup>a</sup>	2.84±0.00 <sup>c</sup>	0.71±0.00 <sup>a</sup>	0.91±0.00 <sup>b</sup>	3.07±0.01 <sup>d</sup>
十三烷二酸	1.71	[M+H] <sup>+</sup>	0.81±0.00 <sup>a</sup>	0.27±0.00 <sup>a</sup>	0.41±0.00 <sup>a</sup>	0.38±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	0.21±0.00 <sup>a</sup>
(+)-脱落酸	1.93	[M+H] <sup>+</sup>	2.82±0.00 <sup>d</sup>	0.83±0.00 <sup>c</sup>	1.40±0.00 <sup>c</sup>	0.31±0.00 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>b</sup>	0.29±0.00 <sup>ab</sup>
柠康酸	2.8	[M-H] <sup>-</sup>	2.49±0.00 <sup>a</sup>	4.45±0.26 <sup>d</sup>	3.72±0.19 <sup>b</sup>	3.59±0.16 <sup>c</sup>	2.42±0.08 <sup>c</sup>	1.85±0.06 <sup>b</sup>
衣康酸	2.92	[M-H] <sup>-</sup>	2.53±0.00 <sup>a</sup>	4.36±0.21 <sup>d</sup>	3.60±0.12 <sup>b</sup>	3.57±0.17 <sup>c</sup>	2.36±0.05 <sup>c</sup>	1.73±0.02 <sup>b</sup>
中康酸	3.15	[M-H] <sup>-</sup>	2.55±0.01 <sup>a</sup>	4.25±0.07 <sup>d</sup>	3.53±0.04 <sup>b</sup>	3.45±0.05 <sup>c</sup>	2.30±0.02 <sup>c</sup>	1.73±0.01 <sup>b</sup>
1-棕榈酰-2-亚油酰磷脂酰乙醇胺	5.05	[M-H] <sup>-</sup>	1.34±0.21 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	2.67±0.09 <sup>a</sup>	1.41±0.18 <sup>a</sup>	13.24±1.85 <sup>b</sup>	9.18±0.78 <sup>ab</sup>
十一烷二酸	7.06	[M-H] <sup>-</sup>	0.20±0.00 <sup>a</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.24±0.00 <sup>a</sup>	0.29±0.01 <sup>a</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>
月桂酸	7.32	[M-H] <sup>-</sup>	0.51±0.00 <sup>b</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.24±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>a</sup>	0.11±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>
亚油酸	9.47	[M-H] <sup>-</sup>	19.02±6.18 <sup>a</sup>	6.86±0.11 <sup>a</sup>	15.89±0.31 <sup>ab</sup>	8.20±0.11 <sup>a</sup>	6.04±0.29 <sup>a</sup>	12.49±0.03 <sup>b</sup>
十八烷-9,12,15-三烯酸	13.8	[M+FA-H] <sup>-</sup>	3.88±0.04 <sup>a</sup>	0.62±0.02 <sup>a</sup>	7.52±0.22 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>a</sup>	0.34±0.00 <sup>a</sup>	0.34±0.00 <sup>a</sup>
十五烷酸	14.47	[M+H] <sup>+</sup>	1.09±0.00 <sup>a</sup>	0.44±0.00 <sup>a</sup>	0.79±0.00 <sup>a</sup>	0.52±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	0.49±0.00 <sup>a</sup>
十二烷基苯磺酸	18.35	[M-H] <sup>-</sup>	59.54±0.45 <sup>a</sup>	22.72±5.37 <sup>a</sup>	27.03±0.39 <sup>a</sup>	25.93±2.21 <sup>a</sup>	13.69±1.57 <sup>a</sup>	29.95±7.12 <sup>a</sup>
(10E,15Z)-9,12,13-三羟基十八碳-10,15-二烯酸	18.39	[M-H] <sup>-</sup>	5.09±0.03 <sup>c</sup>	0.41±0.00 <sup>ab</sup>	1.17±0.00 <sup>b</sup>	0.34±0.00 <sup>a</sup>	0.51±0.00 <sup>b</sup>	0.47±0.00 <sup>ab</sup>
芥酸	19.15	[M-H] <sup>-</sup>	5.13±1.03 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>	0.85±0.07 <sup>a</sup>	0.43±0.01 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.12±0.00 <sup>a</sup>
月桂酰胺丙基二甲基胺	20.00	[M+H] <sup>+</sup>	0.34±0.00 <sup>a</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	2.01±0.75 <sup>a</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>
α-亚麻酸	20.77	[M-H] <sup>-</sup>	18.45±0.40 <sup>d</sup>	2.92±0.02 <sup>bc</sup>	3.83±0.02 <sup>ab</sup>	2.06±0.00 <sup>a</sup>	1.94±0.02 <sup>ab</sup>	3.40±0.00 <sup>c</sup>
反油酸	20.94	[M-H] <sup>-</sup>	9.87±0.09 <sup>a</sup>	1.58±0.01 <sup>a</sup>	4.07±0.77 <sup>a</sup>	4.79±0.28 <sup>a</sup>	3.81±1.10 <sup>a</sup>	3.77±0.49 <sup>a</sup>
反式-11-十八烯酸	21.46	[M-H] <sup>-</sup>	10.11±0.05 <sup>a</sup>	1.68±0.05 <sup>a</sup>	3.66±0.36 <sup>a</sup>	4.62±0.12 <sup>a</sup>	3.40±0.59 <sup>a</sup>	3.49±0.21 <sup>a</sup>
油酸	21.54	[M-H] <sup>-</sup>	11.27±0.03 <sup>a</sup>	2.03±0.22 <sup>a</sup>	3.20±0.00 <sup>a</sup>	5.27±0.63 <sup>a</sup>	2.75±0.07 <sup>a</sup>	3.26±0.06 <sup>a</sup>
硬脂酸	22.56	[M-H] <sup>-</sup>	20.48±3.69 <sup>a</sup>	5.13±0.04 <sup>a</sup>	10.23±0.53 <sup>a</sup>	45.66±1.44 <sup>a</sup>	5.27±0.14 <sup>a</sup>	6.60±0.09 <sup>a</sup>
壬二酸	23.82	[M-H] <sup>-</sup>	1.30±0.01 <sup>a</sup>	0.51±0.00 <sup>a</sup>	1.57±0.12 <sup>a</sup>	2.21±0.39 <sup>a</sup>	0.46±0.00 <sup>a</sup>	0.51±0.00 <sup>a</sup>
2-异丙基苹果酸	24.71	[M-H] <sup>-</sup>	7.68±0.01 <sup>a</sup>	8.22±0.03 <sup>d</sup>	5.77±0.00 <sup>ab</sup>	4.87±0.00 <sup>ab</sup>	6.82±0.01 <sup>c</sup>	3.68±0.00 <sup>b</sup>

其中十二烷基苯磺酸在珠宝李果实中的相对含量达到 59.54%。(+)脱落酸、 $\alpha$ -亚麻酸、(10E,15Z)-9,12,13-三羟基十八碳-10,15-二烯酸和柠檬酸等多种脂肪酸组分在不同品种李果实中的相对含量差异性显著( $P<0.05$ )。

### 2.2.3 李果实中萜烯类组分测定结果

如表 4 所示,在所鉴定的 18 个萜烯类化合物中,除异维 A 酸、白桦脂酸、齐墩果酸 3 种化合物在不同品种李果实中的相对含量无显著差异外,其余组分相对含量差异性显著( $P<0.05$ )。酥李果实中相对含量最高的萜烯类化合物为科罗索酸 44.96%,科罗索酸 44.96%、常春藤皂苷元 44.30%和积雪草酸 26.69%等;而其他 5 种李果实相对含量最高的化合物均为积雪草酸,相对含量最高为珠宝李,达到 138.00%,其他排名靠前的有珠宝李的科罗索酸为 34.89%、常春藤皂苷元为 34.93%、齐墩果酸为 33.52%等,红李的白桦脂酸为 10.53%、齐墩果酸为 9.27%等,蜂糖李的白桦脂酸 37.87%、齐墩果酸均为 37.87%、常春藤皂苷元为 35.78%等,江安李的科罗索酸为 41.97%、常春藤皂苷元为 39.73%、齐墩果酸为 16.05%等,青红脆李的白桦脂酸为 9.46%、齐墩果酸为 9.08%、常春藤皂苷元为 7.93%等。由此可见,李果实中的萜烯类化合物以积雪草酸、科罗索酸、常春藤皂苷元、齐墩果酸和白桦脂酸 5 种物质为主,其含量占所鉴定的 18 个化合物相对含量总量的 87%以上。

### 2.2.4 李果实中核苷酸组分测定结果

如表 5 所示,11 种核苷酸在不同品种李果实中的相对含量存在显著性差异( $P<0.05$ )。相对含量较高的有:珠宝李果实中的腺嘌呤、尿苷等,红李果实中的腺苷、尿苷和 5-脱氧-5-甲硫腺苷等,蜂糖李果实中的尿苷、腺嘌呤、5-脱氧-5-甲硫腺苷和  $\beta$ -烟酰胺单核苷酸等,江安李果实中的尿苷、腺嘌呤、5-脱氧-5-甲硫腺苷等,青红脆李果实中的腺苷、尿苷、腺嘌呤等,酥李果实中的腺嘌呤、尿苷、5-脱氧-5-甲硫腺苷等,目前对李果实中核苷酸类化合物的含量测定分析未见相关文献报道。

### 2.2.5 李果实中酚类及酚酸组分测定结果

酚类化合物是李果实中丰富的次级代谢物,是具有抗氧化性能、对人类健康有积极影响的生物活性物质<sup>[31]</sup>,如表 6 所示,本研究共鉴定出了李果实中的 6 个酚类化合物和 10 个酚酸类化合物,不同品种李果实中的酚类及酚酸组分相对含量存在显著性差异( $P<0.05$ )。酚类组分中,红李果实中的对羟基苯甲醛相对含量最高,为 1.53%,其他酚类组分在所有李果实中的相对含量均在 1%以下。酚酸组分中,青红脆李果实中的相对总含量较其他李果实低,仅香草酸相对含量大于 1%,为 2.35%。其他 5 种李果实酚酸组分相对含量最高的是新绿原酸,相对含量在 20.28%~101.20%之间,其中酥李果实中新绿原酸相

表 4 李果实中萜烯类组分测定结果(相对峰面积,%)  
Table 4 Analysis results of terpene components in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
2-顺式,4-反式脱落酸	1.49	[M-H] <sup>-</sup>	2.98±0.00 <sup>c</sup>	0.68±0.00 <sup>a</sup>	1.06±0.00 <sup>a</sup>	2.24±0.00 <sup>d</sup>	3.84±0.00 <sup>c</sup>	0.97±0.00 <sup>b</sup>
哈巴苷	6.12	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	0.54±0.00 <sup>ab</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.49±0.00 <sup>b</sup>	0.58±0.00 <sup>c</sup>	0.40±0.00 <sup>c</sup>	1.10±0.00 <sup>d</sup>
异维 A 酸	6.90	[M-H] <sup>-</sup>	0.32±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>a</sup>	0.28±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>
(1R,4Z,9S)-4-羟甲基-11,11-二甲基-8-亚甲基双环[7.2.0]环氧乙烷-4-乙二胺-3-酮	7.07	[M-H] <sup>-</sup>	0.57±0.00 <sup>b</sup>	0.24±0.00 <sup>b</sup>	0.44±0.00 <sup>b</sup>	0.36±0.00 <sup>b</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.18±0.00 <sup>a</sup>
断马钱子苷二甲基缩醛	7.93	[M+Na] <sup>+</sup>	0.26±0.00 <sup>a</sup>	0.25±0.00 <sup>ab</sup>	0.64±0.01 <sup>ab</sup>	0.98±0.00 <sup>c</sup>	0.40±0.01 <sup>bc</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>
羟基积雪草苷	8.39	[M+H] <sup>+</sup>	5.06±0.02 <sup>c</sup>	2.60±0.00 <sup>d</sup>	4.36±0.00 <sup>d</sup>	4.82±0.00 <sup>c</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>	1.22±0.00 <sup>b</sup>
甘草次酸	11.50	[M-H] <sup>-</sup>	0.24±0.00 <sup>a</sup>	0.57±0.00 <sup>bc</sup>	0.72±0.00 <sup>b</sup>	1.06±0.00 <sup>d</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.62±0.00 <sup>cd</sup>
梔子苷	13.96	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	0.76±0.00 <sup>b</sup>	0.48±0.00 <sup>c</sup>	0.19±0.00 <sup>a</sup>	0.57±0.00 <sup>bc</sup>	0.38±0.00 <sup>bc</sup>	0.54±0.00 <sup>c</sup>
獐牙菜苷	14.11	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	1.24±0.00 <sup>b</sup>	0.64±0.00 <sup>c</sup>	0.62±0.00 <sup>a</sup>	0.97±0.00 <sup>d</sup>	0.61±0.00 <sup>d</sup>	0.74±0.00 <sup>d</sup>
积雪草酸	16.13	[M-H] <sup>-</sup>	138.00±1.74 <sup>d</sup>	36.18±2.10 <sup>bc</sup>	56.40±0.66 <sup>ab</sup>	55.78±0.68 <sup>c</sup>	33.23±0.56 <sup>bc</sup>	26.69±0.11 <sup>a</sup>
长叶薄荷酮	17.23	[M+H] <sup>+</sup>	1.69±0.00 <sup>b</sup>	0.36±0.00 <sup>a</sup>	1.10±0.00 <sup>b</sup>	1.18±0.00 <sup>c</sup>	1.29±0.00 <sup>d</sup>	1.46±0.00 <sup>d</sup>
白桦脂酮酸	17.65	[M+H] <sup>+</sup>	2.00±0.00 <sup>a</sup>	0.56±0.00 <sup>b</sup>	1.04±0.00 <sup>b</sup>	0.58±0.00 <sup>a</sup>	0.51±0.00 <sup>b</sup>	0.35±0.00 <sup>a</sup>
二十酸	17.70	[M-H] <sup>-</sup>	1.98±0.02 <sup>b</sup>	0.19±0.00 <sup>a</sup>	0.62±0.00 <sup>a</sup>	0.56±0.01 <sup>a</sup>	0.24±0.00 <sup>a</sup>	0.73±0.00 <sup>b</sup>
常春藤皂苷元	19.29	[M-H] <sup>-</sup>	34.93±2.90 <sup>ab</sup>	3.75±0.34 <sup>a</sup>	35.78±3.37 <sup>bc</sup>	39.73±0.36 <sup>cd</sup>	7.93±0.53 <sup>a</sup>	44.30±3.96 <sup>d</sup>
科罗索酸	19.68	[M-H] <sup>-</sup>	34.89±4.37 <sup>ab</sup>	3.36±0.05 <sup>a</sup>	27.28±5.00 <sup>bc</sup>	41.97±10.52 <sup>cd</sup>	7.93±0.19 <sup>a</sup>	44.96±5.21 <sup>d</sup>
青蒿素	20.05	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	1.11±0.00 <sup>d</sup>	0.34±0.00 <sup>c</sup>	0.58±0.00 <sup>c</sup>	0.16±0.00 <sup>a</sup>	0.14±0.00 <sup>b</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>
白桦脂酸	20.81	[M-H] <sup>-</sup>	26.97±1.44 <sup>a</sup>	10.53±2.83 <sup>a</sup>	37.87±3.23 <sup>a</sup>	15.17±0.03 <sup>a</sup>	9.46±1.54 <sup>a</sup>	17.10±2.56 <sup>a</sup>
齐墩果酸	21.07	[M-H] <sup>-</sup>	33.52±6.89 <sup>a</sup>	9.27±0.27 <sup>a</sup>	37.87±3.23 <sup>a</sup>	16.05±1.55 <sup>a</sup>	9.08±0.19 <sup>a</sup>	20.13±4.32 <sup>a</sup>

表 5 李果实中核苷酸组分测定结果(相对峰面积, %)  
Table 5 Analysis results of nucleotide components in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
$\beta$ -烟酰胺单核苷酸	1.54	[M+H] <sup>+</sup>	1.57±0.00 <sup>ab</sup>	0.80±0.00 <sup>c</sup>	1.06±0.00 <sup>a</sup>	1.06±0.00 <sup>bc</sup>	0.52±0.00 <sup>a</sup>	0.54±0.00 <sup>a</sup>
腺嘌呤	2.80	[M+H] <sup>+</sup>	10.39±0.01 <sup>c</sup>	0.88±0.00 <sup>a</sup>	11.67±0.05 <sup>d</sup>	6.48±0.00 <sup>c</sup>	2.84±0.00 <sup>b</sup>	6.68±0.01 <sup>d</sup>
5'-腺苷酸	7.26	[M+H] <sup>+</sup>	0.10±0.00 <sup>a</sup>	0.08±0.00 <sup>b</sup>	0.25±0.00 <sup>d</sup>	0.15±0.00 <sup>c</sup>	0.13±0.00 <sup>d</sup>	0.10±0.00 <sup>c</sup>
5-脱氧-5-甲硫腺苷	8.78	[M+H] <sup>+</sup>	2.85±0.00 <sup>a</sup>	2.06±0.00 <sup>c</sup>	3.38±0.00 <sup>b</sup>	2.55±0.00 <sup>b</sup>	2.24±0.00 <sup>d</sup>	2.64±0.00 <sup>d</sup>
胞苷	14.20	[M+H] <sup>+</sup>	0.31±0.00 <sup>a</sup>	0.33±0.00 <sup>c</sup>	0.44±0.00 <sup>bc</sup>	0.66±0.00 <sup>d</sup>	0.55±0.00 <sup>c</sup>	0.16±0.00 <sup>ab</sup>
腺苷	14.26	[M+H] <sup>+</sup>	0.36±0.00 <sup>a</sup>	6.97±0.03 <sup>c</sup>	0.92±0.00 <sup>a</sup>	2.43±0.00 <sup>c</sup>	4.30±0.00 <sup>d</sup>	1.10±0.01 <sup>b</sup>
尿苷	15.08	[M-H] <sup>-</sup>	7.77±0.01 <sup>a</sup>	3.40±0.01 <sup>a</sup>	12.23±0.03 <sup>d</sup>	6.68±0.01 <sup>b</sup>	3.98±0.01 <sup>b</sup>	6.08±0.04 <sup>c</sup>
UDP-葡萄糖	18.22	[M-H] <sup>-</sup>	—	—	0.04±0.00 <sup>a</sup>	0.01±0.00 <sup>a</sup>	—	0.48±0.00 <sup>b</sup>
1-甲基腺苷	19.96	[M+H] <sup>+</sup>	0.14±0.00 <sup>abc</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.11±0.00 <sup>abc</sup>	0.07±0.00 <sup>ab</sup>	0.06±0.00 <sup>c</sup>	0.07±0.00 <sup>c</sup>
异鸟苷	22.51	[M-H] <sup>-</sup>	0.29±0.00 <sup>a</sup>	0.25±0.00 <sup>b</sup>	0.95±0.01 <sup>c</sup>	2.21±0.00 <sup>c</sup>	0.74±0.00 <sup>c</sup>	0.77±0.00 <sup>c</sup>
鸟苷	22.56	[M-H] <sup>-</sup>	0.28±0.00 <sup>a</sup>	0.25±0.00 <sup>b</sup>	0.93±0.01 <sup>c</sup>	2.21±0.00 <sup>c</sup>	0.80±0.01 <sup>c</sup>	0.82±0.01 <sup>c</sup>

注: —表示该物质相对含量低于 0.00%。

表 6 李果实酚类及酚酸组分测定结果(相对峰面积, %)  
Table 6 Analysis results of phenolic and phenolic acids in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
间羟基苯甲酸	0.76	[M-H] <sup>-</sup>	0.45±0.00 <sup>b</sup>	2.17±0.02 <sup>d</sup>	0.30±0.00 <sup>a</sup>	0.37±0.00 <sup>ab</sup>	0.47±0.00 <sup>c</sup>	0.30±0.00 <sup>b</sup>
对羟基苯甲酸	0.82	[M-H] <sup>-</sup>	0.45±0.00 <sup>b</sup>	2.66±0.02 <sup>d</sup>	0.29±0.00 <sup>a</sup>	0.39±0.00 <sup>ab</sup>	0.51±0.00 <sup>c</sup>	0.32±0.00 <sup>b</sup>
对羟基苯甲醛	1.33	[M-H] <sup>-</sup>	0.40±0.00 <sup>c</sup>	1.53±0.00 <sup>d</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>c</sup>	0.10±0.00 <sup>b</sup>
羟基酪醇	1.39	[M-H] <sup>-</sup>	0.46±0.00 <sup>b</sup>	0.11±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>c</sup>	0.30±0.00 <sup>bc</sup>	0.09±0.00 <sup>a</sup>	0.26±0.00 <sup>bc</sup>
2,3-二羟基苯甲酸	3.62	[M-H] <sup>-</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>	0.56±0.00 <sup>d</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>b</sup>
香草酸	3.90	[M+H] <sup>+</sup>	2.82±0.00 <sup>ab</sup>	5.08±0.02 <sup>d</sup>	1.67±0.00 <sup>a</sup>	1.94±0.00 <sup>b</sup>	2.35±0.00 <sup>c</sup>	1.43±0.00 <sup>b</sup>
阿魏酸	3.94	[M+H] <sup>+</sup>	0.32±0.00 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.84±0.00 <sup>b</sup>	0.52±0.00 <sup>b</sup>	0.30±0.00 <sup>b</sup>	1.29±0.00 <sup>c</sup>
2,5-二羟基苯甲酸	3.99	[M-H] <sup>-</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>	0.55±0.00 <sup>d</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>c</sup>	0.04±0.00 <sup>b</sup>
原儿茶酸	4.19	[M-H] <sup>-</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>	0.54±0.00 <sup>d</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>c</sup>	0.04±0.00 <sup>b</sup>
丹皮酚	4.65	[M+H] <sup>+</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>a</sup>	0.37±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>ab</sup>	0.42±0.00 <sup>b</sup>	0.26±0.00 <sup>a</sup>
新绿原酸	7.00	[M-H] <sup>-</sup>	31.03±0.32 <sup>b</sup>	49.83±3.57 <sup>c</sup>	20.28±0.05 <sup>b</sup>	72.66±0.42 <sup>c</sup>	0.75±0.00 <sup>a</sup>	101.20±0.78 <sup>d</sup>
丹参素	7.32	[M-H] <sup>-</sup>	0.42±0.00 <sup>a</sup>	0.47±0.00 <sup>d</sup>	0.50±0.00 <sup>b</sup>	0.42±0.00 <sup>b</sup>	0.32±0.00 <sup>c</sup>	0.29±0.00 <sup>b</sup>
4-羟基-3-甲氧基苦杏仁酸	7.36	[M-H] <sup>-</sup>	0.42±0.00 <sup>a</sup>	0.47±0.00 <sup>d</sup>	0.50±0.00 <sup>b</sup>	0.42±0.00 <sup>b</sup>	0.32±0.00 <sup>c</sup>	0.29±0.00 <sup>b</sup>
红景天苷	8.79	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	0.16±0.00 <sup>a</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.37±0.00 <sup>b</sup>	0.09±0.00 <sup>a</sup>	0.31±0.00 <sup>c</sup>	0.11±0.00 <sup>a</sup>
4-羟基-3-甲基苯甲酸	17.35	[M+H] <sup>+</sup>	0.18±0.00 <sup>a</sup>	0.47±0.00 <sup>c</sup>	0.36±0.00 <sup>d</sup>	0.20±0.00 <sup>c</sup>	0.11±0.00 <sup>b</sup>	0.11±0.01 <sup>b</sup>
绿原酸	19.17	[M+H] <sup>+</sup>	1.10±0.00 <sup>a</sup>	1.44±0.00 <sup>b</sup>	0.85±0.00 <sup>a</sup>	1.90±0.00 <sup>b</sup>	0.21±0.00 <sup>a</sup>	2.19±0.00 <sup>c</sup>

对含量最高。不同李果实中相对含量大于 1% 的其他酚酸类化合物还有珠宝李果实中的绿原酸, 红李果实中的对羟基苯甲酸、间羟基苯甲酸和绿原酸, 江安李果实中的绿原酸, 酥李果实中绿原酸和阿魏酸等。

#### 2.2.6 李果实中香豆素类组分测定结果

如表 7 所示, 在所鉴定的 9 个香豆素类化合物中, 除 6-甲基香豆素外, 不同品种李果实中香豆素类化合物相对含量存在显著性差异( $P < 0.05$ )。酥李果实中相对含量最高的为香豆

素 12.98%, 其次为秦皮甙 7.76%, 其他 5 种李果实相对含量最高的化合物均为秦皮甙, 相对含量在 3.58%~8.88% 之间。除秦皮甙和香豆素外, 珠宝李果实中相对含量较高的香豆素类物质还有东莨菪内酯、秦皮甲素、6-甲基香豆素等, 而这些物质在其他李果中的相对含量低于 1%。

#### 2.2.7 李果实中含氮化合物组分测定结果

如表 8 所示, 共发现李果实中的 8 个含氮化合物, 除 3,5-二甲基金刚胺外, 其他含氮化合物在不同品种李果实

中的相对含量存在显著差异性( $P<0.05$ )。不同李果实中相对含量较高的化合物分别有: 珠宝李果实中的亚油醇乙醇胺、油酰单乙醇胺、4-羟基喹啉等, 红李果实中的亚油醇乙醇胺、4-羟基喹啉和亚精胺等, 蜂糖李果实中的亚油醇乙醇胺、油酰单乙醇胺和亚精胺等, 江安李果实中的亚油醇乙醇胺、油酰单乙醇胺、亚精胺等, 青红脆李果实中的亚精胺和亚油醇乙醇胺等, 酥李果实中的亚油醇乙醇胺、油酰单乙醇胺和亚精胺等。

### 2.2.8 李果实中其他代谢产物测定结果

除上述所分析的化合物种类以外, 李果实中还包括表 9 中的 15 个其他化合物, 包括糖苷类、葡萄糖衍生物、

生物碱, 木脂素、胺类有机物、酮、吡啶、有机碱和甾体类等, 除栲酮, 其他化合物在不同品种李果实中的相对含量存在显著差异性( $P<0.05$ )。相对含量较高的有: 珠宝李的 3-吡啶丙烯酸、果糖-6-磷酸、*D*-葡萄糖-6-磷酸等, 红李的山柰酚-3-*A*-吡喃阿拉伯糖苷、*D*-葡萄糖-6-磷酸、果糖-6-磷酸等, 蜂糖李的松脂醇-4-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷、3-吡啶丙烯酸等, 江安李的松脂醇-4-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷、果糖-6-磷酸、*D*-葡萄糖-6-磷酸等, 青红脆李的松脂醇-4-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷、(+)-表松脂素-4-*O*- $\beta$ -*D*-葡萄糖苷等以及酥李的松脂醇-4-*O*- $\beta$ -*D*-吡喃葡萄糖苷、(+)-表松脂素-4-*O*- $\beta$ -*D*-葡萄糖苷、3-吡啶丙烯酸等。

表 7 李果实中香豆素类组分测定结果(相对峰面积, %)  
Table 7 Results of analysis of coumarins in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
6-甲基香豆素	0.46	[M+H] <sup>+</sup>	1.21±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>	0.87±0.00 <sup>a</sup>	0.70±0.00 <sup>a</sup>	0.41±0.00 <sup>a</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>
香豆素	1.38	[M+H] <sup>+</sup>	1.97±0.00 <sup>b</sup>	1.69±0.03 <sup>c</sup>	5.60±0.00 <sup>d</sup>	0.76±0.00 <sup>ab</sup>	0.12±0.00 <sup>a</sup>	12.98±0.00 <sup>c</sup>
秦皮素	1.60	[M+H] <sup>+</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>	0.11±0.00 <sup>ab</sup>	0.27±0.00 <sup>bc</sup>	0.28±0.00 <sup>c</sup>	0.82±0.00 <sup>c</sup>	0.48±0.00 <sup>d</sup>
异茛菪亭	3.94	[M+H] <sup>+</sup>	0.50±0.00 <sup>b</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.44±0.00 <sup>c</sup>	0.26±0.00 <sup>b</sup>	0.59±0.00 <sup>c</sup>	0.43±0.00 <sup>d</sup>
秦皮乙素	4.08	[M-H] <sup>-</sup>	0.29±0.00 <sup>a</sup>	0.35±0.00 <sup>c</sup>	0.18±0.00 <sup>a</sup>	0.23±0.00 <sup>ab</sup>	0.13±0.00 <sup>ab</sup>	0.23±0.00 <sup>b</sup>
秦皮甙	6.06	[M-H] <sup>-</sup>	3.58±0.00 <sup>a</sup>	5.48±0.06 <sup>bc</sup>	7.99±0.01 <sup>b</sup>	8.88±0.15 <sup>cd</sup>	6.10±0.01 <sup>dc</sup>	7.76±0.01 <sup>c</sup>
东茛菪内酯	6.90	[M+H] <sup>+</sup>	2.48±0.25 <sup>b</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.37±0.00 <sup>c</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.58±0.00 <sup>c</sup>	0.36±0.00 <sup>d</sup>
异紫花前胡内酯	14.47	[M+H] <sup>+</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.01±0.00 <sup>a</sup>	0.26±0.00 <sup>b</sup>	0.67±0.00 <sup>c</sup>	0.58±0.00 <sup>d</sup>	0.94±0.00 <sup>c</sup>
秦皮甲素	22.54	[M+H] <sup>+</sup>	1.43±0.21 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>c</sup>	0.44±0.00 <sup>b</sup>	0.48±0.00 <sup>a</sup>	0.43±0.00 <sup>d</sup>	0.50±0.00 <sup>b</sup>

表 8 李果实中含氮化合物组分测定结果(相对峰面积, %)  
Table 8 Analysis results of nitrogen compounds in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
亚精胺	1.33	[M+H] <sup>+</sup>	1.64±0.00 <sup>a</sup>	1.10±0.00 <sup>b</sup>	1.97±0.00 <sup>b</sup>	1.99±0.00 <sup>c</sup>	1.54±0.00 <sup>d</sup>	1.19±0.00 <sup>b</sup>
4-羟基喹啉	1.41	[M+H] <sup>+</sup>	1.73±0.00 <sup>c</sup>	1.34±0.00 <sup>f</sup>	0.48±0.00 <sup>a</sup>	0.48±0.00 <sup>b</sup>	0.56±0.00 <sup>d</sup>	0.51±0.00 <sup>c</sup>
3,5-二甲基金刚胺	1.49	[M+H] <sup>+</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>
精胺	1.59	[M+H] <sup>+</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>ab</sup>	0.07±0.00 <sup>ab</sup>	0.05±0.00 <sup>ab</sup>	0.06±0.00 <sup>b</sup>	0.03±0.00 <sup>ab</sup>
5-羟基吡啶	3.45	[M+H] <sup>+</sup>	0.06±0.00 <sup>ab</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.09±0.00 <sup>b</sup>	0.12±0.00 <sup>b</sup>	0.46±0.00 <sup>c</sup>	0.13±0.00 <sup>d</sup>
甘油磷酸胆碱	14.15	[M+H] <sup>+</sup>	1.18±0.00 <sup>b</sup>	0.85±0.00 <sup>c</sup>	0.84±0.00 <sup>b</sup>	1.66±0.00 <sup>d</sup>	0.78±0.00 <sup>c</sup>	0.26±0.00 <sup>a</sup>
油酰单乙醇胺	16.25	[M+H] <sup>+</sup>	2.20±0.00 <sup>a</sup>	0.27±0.00 <sup>a</sup>	10.85±0.13 <sup>d</sup>	3.57±0.00 <sup>b</sup>	0.50±0.00 <sup>a</sup>	4.92±0.08 <sup>c</sup>
亚油醇乙醇胺	18.86	[M+H] <sup>+</sup>	14.27±0.00 <sup>b</sup>	2.69±0.00 <sup>a</sup>	18.57±0.49 <sup>d</sup>	10.10±0.03 <sup>bc</sup>	1.06±0.00 <sup>a</sup>	9.14±0.24 <sup>cd</sup>

表 9 李果实中其他化合物组分测定结果(相对峰面积, %)  
Table 9 Analysis results of other compounds in plum fruit (relative peak area, %)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
色胺	0.34	[M+H] <sup>+</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>d</sup>	0.14±0.00 <sup>c</sup>	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.14±0.00 <sup>d</sup>	0.03±0.00 <sup>ab</sup>
葫芦巴碱	0.52	[M+H] <sup>+</sup>	0.28±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.00 <sup>b</sup>	0.55±0.00 <sup>d</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.26±0.00 <sup>d</sup>	0.29±0.00 <sup>c</sup>
果糖-6-磷酸	1.35	[M-H] <sup>-</sup>	3.62±0.00 <sup>c</sup>	1.27±0.02 <sup>d</sup>	2.01±0.06 <sup>c</sup>	1.97±0.00 <sup>b</sup>	0.98±0.00 <sup>a</sup>	1.21±0.00 <sup>a</sup>
<i>D</i> -葡萄糖-6-磷酸	1.49	[M-H] <sup>-</sup>	3.31±0.05 <sup>c</sup>	1.24±0.02 <sup>d</sup>	1.90±0.03 <sup>c</sup>	2.08±0.02 <sup>b</sup>	1.04±0.01 <sup>a</sup>	1.29±0.01 <sup>a</sup>
对羟基苯乙胺	2.87	[M+H] <sup>+</sup>	0.47±0.00 <sup>c</sup>	0.17±0.00 <sup>c</sup>	0.45±0.00 <sup>d</sup>	0.08±0.00 <sup>a</sup>	0.45±0.00 <sup>c</sup>	0.13±0.00 <sup>b</sup>
尿嘧啶	6.31	[M+H] <sup>+</sup>	0.81±0.00 <sup>a</sup>	0.45±0.00 <sup>b</sup>	1.30±0.00 <sup>d</sup>	0.79±0.00 <sup>c</sup>	0.47±0.00 <sup>c</sup>	0.58±0.00 <sup>c</sup>



表 9(续)

组分	保留时间/min	离子模式	珠宝李	红李	蜂糖李	江安李	青红脆李	酥李
3-吡啶丙烯酸	6.90	[M+H] <sup>+</sup>	8.06±0.00 <sup>c</sup>	0.21±0.00 <sup>a</sup>	3.70±0.00 <sup>d</sup>	1.00±0.00 <sup>b</sup>	1.40±0.00 <sup>c</sup>	3.62±0.00 <sup>c</sup>
山奈酚-3-A-吡喃阿拉伯糖苷	8.15	[M-H] <sup>-</sup>	0.85±0.00 <sup>a</sup>	3.52±0.00 <sup>d</sup>	2.33±0.00 <sup>b</sup>	1.64±0.00 <sup>b</sup>	2.19±0.00 <sup>d</sup>	1.64±0.00 <sup>c</sup>
松脂醇-4-O-β-D-吡喃葡萄糖苷	13.82	[M-H] <sup>-</sup>	2.21±0.00 <sup>a</sup>	0.79±0.00 <sup>a</sup>	3.84±0.00 <sup>b</sup>	5.43±0.00 <sup>c</sup>	4.22±0.00 <sup>d</sup>	5.20±0.00 <sup>d</sup>
栲酮	14.40	[M+H] <sup>+</sup>	0.96±0.00 <sup>a</sup>	0.40±0.00 <sup>a</sup>	0.64±0.00 <sup>a</sup>	0.52±0.00 <sup>a</sup>	0.27±0.00 <sup>a</sup>	0.48±0.00 <sup>a</sup>
葡糖二酸	14.52	[M-H] <sup>-</sup>	0.66±0.00 <sup>a</sup>	1.05±0.00 <sup>c</sup>	0.61±0.00 <sup>ab</sup>	0.67±0.00 <sup>b</sup>	0.26±0.00 <sup>ab</sup>	0.22±0.00 <sup>s</sup>
纤细薯蓣皂苷	16.67	[M+H] <sup>+</sup>	0.01±0.00 <sup>a</sup>	0.13±0.00 <sup>ab</sup>	0.25±0.00 <sup>ab</sup>	0.32±0.00 <sup>b</sup>	0.24±0.00 <sup>b</sup>	0.14±0.00 <sup>ab</sup>
(+)-表松脂素-4-O-β-D-葡萄糖苷	17.90	[M+NH <sub>4</sub> ] <sup>+</sup>	0.92±0.00 <sup>a</sup>	0.35±0.00 <sup>a</sup>	2.24±0.00 <sup>b</sup>	3.27±0.00 <sup>c</sup>	2.62±0.00 <sup>d</sup>	3.08±0.00 <sup>d</sup>
豆腐果苷	22.54	[M-H] <sup>-</sup>	1.23±0.00 <sup>d</sup>	0.37±0.00 <sup>bc</sup>	0.34±0.01 <sup>a</sup>	0.69±0.00 <sup>cd</sup>	0.40±0.00 <sup>bcd</sup>	0.34±0.00 <sup>b</sup>
2-(3-羟基-5-甲氧基苯氧基)-6-(羟甲基)环氧乙烷-3,4,5-三醇	22.55	[M-H] <sup>-</sup>	0.33±0.00 <sup>a</sup>	0.79±0.00 <sup>c</sup>	0.88±0.00 <sup>b</sup>	1.11±0.00 <sup>c</sup>	0.87±0.00 <sup>d</sup>	0.77±0.00 <sup>c</sup>

## 2.3 李果实差异化合物分析

### 2.3.1 ANOVA 分析

对 6 组数据进行 ANOVA 分析, 用组间均方除以组内均方的值(即  $F$ )与 1 相比较, 若  $F$  接近 1, 则说明各组均值间的差异没有统计学意义, 若  $F$  远大于 1, 则说明各组均值间的差异有统计学意义, 筛选条件:  $F > 1, P < 0.01$ 。结果显示, 有 123 个化合物  $F > 2$ , 8 个化合物的  $F \leq 2$ , 说明 123 个化合物对李果实各组均值间的差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3.2 PCA 和 PLS-DA 分析

分别将 6 种李果实的 3 次平行实验样品设置为一组, 质控样品为一组, 即: 珠宝李(1 group)、红李(2 group)、蜂糖李(3 group)、江安李(4 group)、青红脆李(5 group)、酥李(6 group)和质控样品(QC group), 利用 PCA 和 PLS-DA 方法, 对 6 组李果实试样进行差异性分析, 使用 QC 样品对分

析方法的稳定性、数据的可靠性进行了检验。在图 3 中可看到, QC 样品密集的分布在 PCA 得分图上, 说明 QC 样品的重复性较好, 实验所采集的数据稳定性、可靠性较高, 6 组不同品种李果实的数据无重叠部分, 说明组间具备很好的区分度。

PLS-DA 中的变量重要性投影值(variable importance in the projection, VIP): 既考察物质本身的变化, 也考察该物质在整体数据里所占的比重, 变化与比重越大, VIP 越大, 筛选条件:  $VIP > 1$ 。结果显示, 用于区分 6 组李果的化合物组分, 贡献最大的化合物( $VIP > 1$ )共有 32 个, 图 4 为 6 组李果中排名最靠前的 30 个  $VIP > 1$  的化合物热图, 排名较靠前的有表儿茶素、原花青素 B<sub>2</sub> 和 UDP-葡萄糖等。根据 PCA 和 PLS-DA 数据分析结果, 可以达到区分 6 组李果品种的目的, 该结论可为李果品种选育、区分以及产地溯源等提供参考。

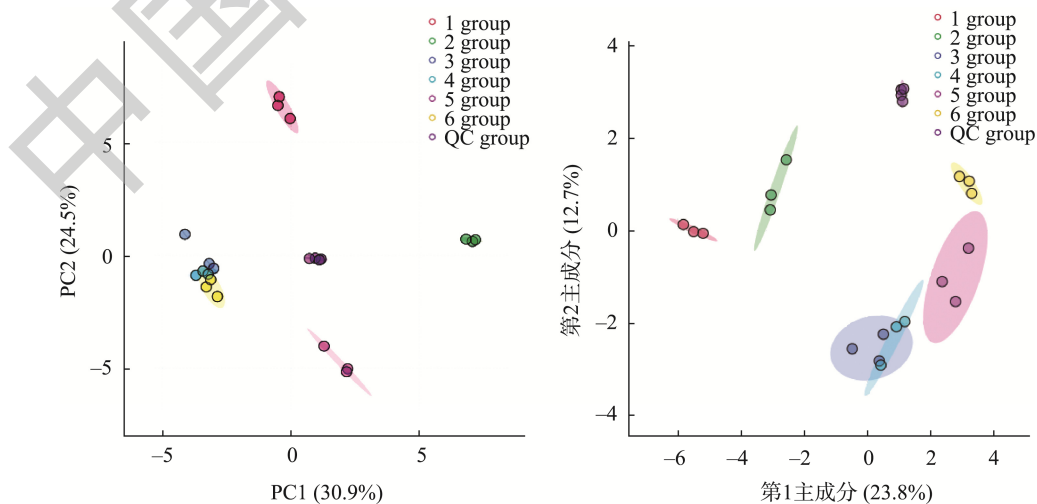


图3 不同李果实样品PCA和PLS-DA分析

Fig.3 PCA and PLS-DA analysis of different plum fruit samples

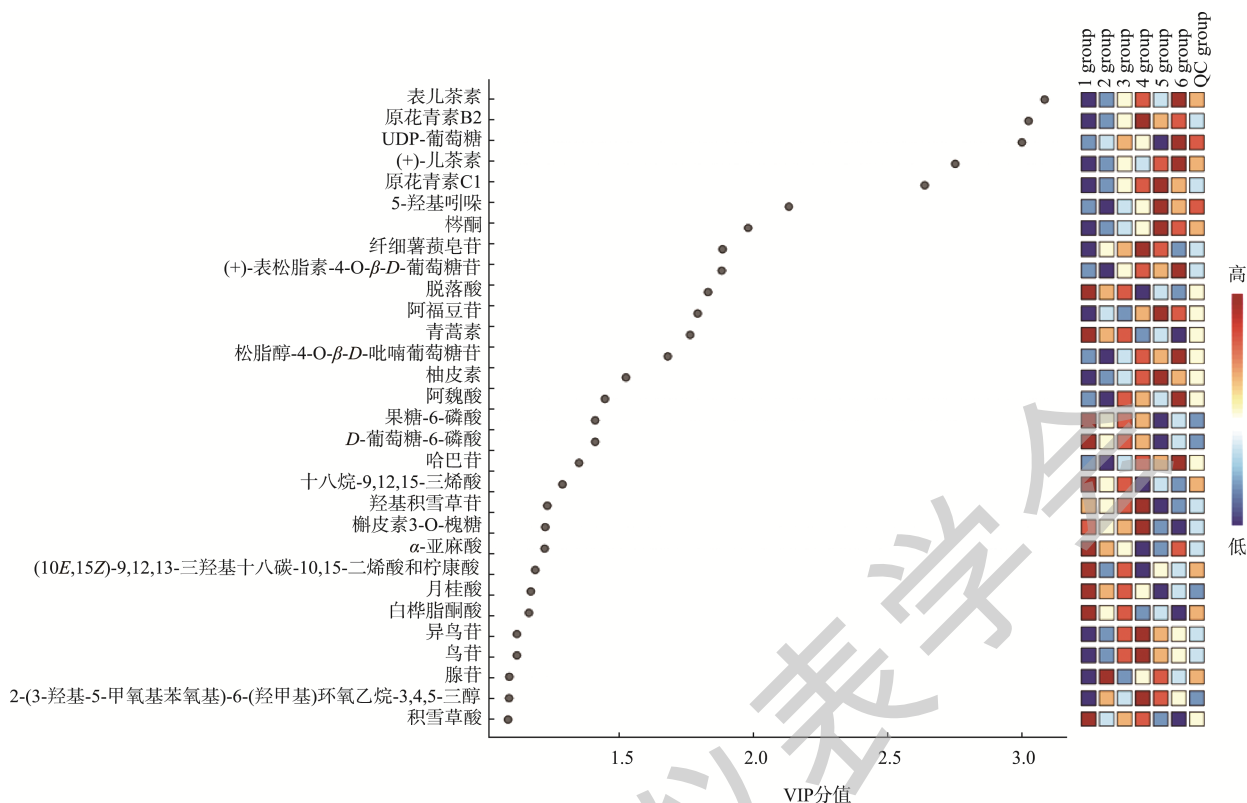


图4 李果果实中排名最靠前的30个化合物

Fig.4 Top 30 compounds in the plum fruit

### 3 结论

本研究从珠宝李、蜂糖李、江安李、青红脆李、红李和酥李 6 个不同品种李果实中共分析鉴定了 130 个化学成分, 其中包括 28 个黄酮类、25 个脂肪酸、18 个萜烯类、11 个核苷酸、10 个酚酸、9 个香豆素类、8 个含氮化合物、6 个酚类以及 15 个其他类化合物。本研究首次提出对李果实中的萜烯、核苷酸、香豆素和含氮化合物等进行相对含量分析, 研究结果表明了 6 个品种李果实存在相同种类的化学成分, 各化合物在不同品种李果实中的相对含量存在显著差异性( $P < 0.05$ )。红李果实中酚酸类化合物含量占比最大, 珠宝李、蜂糖李、江安李、青红脆李和酥李果实中黄酮类化合物含量占比最大。李果实中相对含量最高的黄酮类化合物为槲皮素-3-*D*-木糖甙, 范围在 112.42%~345.08%之间; 相对含量最高的饱和脂肪酸是硬脂酸, 不饱和脂肪酸为十二烷基苯磺酸; 萜烯类化合物以积雪草酸、科罗索酸、常春藤皂苷元、齐墩果酸和白桦脂酸 5 种物质为主, 其含量所占鉴定的 18 个化合物相对含量总量的 87%以上; 相对含量最高的酚类物质为红李果实中的对羟基苯甲醛, 相对含量最高的酚酸类物质为酥李果实中的新绿原酸。ANOVA、PCA 和 PLS-DA 结果表明, 在所鉴定的 130 个化合物中, 有 123 个化合物对李果实各组均值间的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ); 6 组不同品种李果实的数据间具备很好的区分度, 贡献最大的化合物(VIP>1)共有

32 个, 可以达到区分 6 组李果品种的目的; 本研究可为李果品种选育、区分以及产地溯源等提供参考。

### 参考文献

- [1] JELENA T, IVANA G, NEBOJŠA M, *et al.* Determination of fruit chemical contents of two plum cultivars grafted on four rootstocks [J]. *J Food Compos Anal*, 2021, 105: 10394.
- [2] ANTOANETA T, VIKTORIA I, BORYANA T, *et al.* Chemical composition and antioxidant capacity of the fruits of European plum cultivar "Čačanska Lepotica" influenced by different rootstocks [J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2844.
- [3] TATIANA P, NATALIA D. Assessment of biochemical and technical indicators of the quality of plum fruits grown in the south of Russia [J]. *Bio Web Conf*, 2021, 36: 02001.
- [4] 薛晓敏, 韩雪平, 王金政, 等. 不同采收期李果实糖酸组分分析[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(21): 220-224.  
XUE XM, HAN XP, WANG JZ, *et al.* Analysis of sugar and acid components in plum fruits during different harvest periods [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(21): 220-224.
- [5] PAKEZA D, OSMAN M, AMILA O, *et al.* Sugar, acid and phenols in fruit of the sharka-tolerant autochthonous plum genotype 'Mrkosljiva' [J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2022, 64(4): 569-580.
- [6] MUTTALIP G, EMRAH G, ERDAL A, *et al.* Use of spermidine to preserve organic acids, polyphenols, and quality of cold stored plum fruits [J]. *J Food Compos Anal*, 2023, 121: 105411.
- [7] OLGA M, MANUEL C, LAVADO NR, *et al.* First-order discrimination of methanolic extracts from plums according to harvesting date using fluorescence spectra. Quantification of polyphenols [J]. *Microchem J*, 2021, 169: 106533.
- [8] DANIEL C, THI DAP, E MN, *et al.* The use of vibrational spectroscopy to predict vitamin C in Kakadu plum powders (*Terminalia ferdinandiana* exell, Combretaceae) [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 101(8): 3208-3213.

- [9] 陈守一, 王红林, 罗昌国, 等. 贵州晚熟李资源果实营养成分分析与评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 6982-6989.  
CHEN SY, WANG HL, LUO CG, *et al.* Analysis and evaluation of fruit nutritional components of late-maturing plum resources in Guizhou [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(17): 6982-6989.
- [10] 张洁, 李东方, 郭金丽. 不同果肉颜色欧李果实酚类物质的变化及其抗氧化活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 95-104.  
ZHANG J, LI DF, GUO JL. Changes and antioxidant activities of phenolic substances in *Cerasus humilis* fruits with three different flesh colors [J]. *J Northwest Agric Forest Univ (Nat Sd Ed)*, 2024, 52(3): 95-104.
- [11] 邵郅胜, 张薇, 孙聪, 等. 欧李种质资源果实酚类物质分析及种质评价[J]. 西北植物学报, 2023, 43(8): 1405-1414.  
SHAO ZS, ZHANG W, SUN C, *et al.* Fruit phenolic content analysis and germplasm evaluation of *Cerasus humilis* germplasm resources [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2023, 43(8): 1405-1414.
- [12] 崇慧影, 潘绍佐, 李冰晶, 等. 九阡李果实发育期主要有有机酸及氨基酸含量变化[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(18): 92-95.  
CHONG HY, PAN SZ, LI BJ, *et al.* Content changes of main organic acids and amino acids in Jiujian plum during its fruit developing stage [J]. *Hubei Agric Sci*, 2022, 61(18): 92-95.
- [13] 周丹蓉, 廖汝玉, 叶新福. 李果实氨基酸种类和含量分析[J]. 中国南方果树, 2012, 41(2): 25-28.  
ZHOU DR, LIAO RY, YE XF. Analysis of the compositions and contents of amino acids in plums [J]. *South China Fruits*, 2012, 41(2): 25-28.
- [14] LI Y, DENG W, WU L, *et al.* Anti-inflammatory effects of polyphenols from plum (*Prunus salicina* Lindl) on raw264.7 macrophages induced by monosodium urate and potential mechanisms [J]. *Foods*, 2023, 12(2): 254.
- [15] IGWE E, CHARLTON K, ROODENRYS S, *et al.* Anthocyanin-rich plum juice reduces ambulatory blood pressure but not acute cognitive function in younger and older adults: A pilot cross-over dose-timing study [J]. *Nutr Res*, 2017, (47): 28-43.
- [16] DAVID G, BELÉN V, MARÍA G, *et al.* Ingestion of Japanese plums (*Prunus salicina* Lindl. cv. crimson globe) increases the urinary 6-sulfatoxymelatonin and total antioxidant capacity levels in young, middle-aged and elderly humans: Nutritional and functional characterization of their content [J]. *Food Nutr Res*, 2011, 50(4): 229-236.
- [17] NETZEL M, FANNING K, NETZEL G, *et al.* Urinary excretion of antioxidants in healthy humans following queen garnet plum juice ingestion: A new plum variety rich in antioxidant compounds [J]. *J Food Biochem*, 2012, 36(2): 159-170.
- [18] SANTHAKUMAR BA, KUNDUR RA, FANNING K, *et al.* Consumption of anthocyanin-rich Queen Garnet plum juice reduces platelet activation related thrombogenesis in healthy volunteers [J]. *J Funct Foods*, 2015, 12: 11-22.
- [19] SANTHAKUMAR BA, KUNDUR RA, SABAPATHY S, *et al.* The potential of anthocyanin-rich Queen Garnet plum juice supplementation in alleviating thrombotic risk under induced oxidative stress conditions [J]. *J Funct Foods*, 2015, 14: 747-757.
- [20] SHUKITT-HALE B, KALT W, CAREY NA, *et al.* Plum juice, but not dried plum powder, is effective in mitigating cognitive deficits in aged rats [J]. *Nutrition*, 2008, 25(5): 567-573.
- [21] AHMAD R, POTTER D, SOUTHWICK S. Identification and characterization of plum and pluot cultivars by microsatellite markers [J]. *J Hort Sci Biotech*, 2004, 79(1): 164-169.
- [22] KIM D, CHUN O, KIM Y, *et al.* Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(22): 6509-6515.
- [23] RUPASINGHE H, JAYASANKAR S, LAY W. Variation in total phenolics and antioxidant capacity among European plum genotypes [J]. *Sci Hort-sterdam*, 2006, 108(3): 243-246.
- [24] 王英, 李云飞, 陈庚超, 等. 超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱快速检测三七农药残留[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 75-86.  
WANG Y, LI YF, CHEN GC, *et al.* High resolution mass spectrometry method for screening pesticide residues in *Panax notoginseng* [J]. *J Xihua Univ (Nat Sci Ed)*, 2023, 42(5): 75-86.
- [25] 邵影, 张鸿伟, 高瑞刚, 等. 超高压液相色谱-高分辨质谱法同时筛查蓝莓中 90 种农药残留[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 230-240.  
SHAO Y, ZHANG HW, GAO RG, *et al.* Simultaneous screening of 90 pesticides in blueberry by ultra-high pressure liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(5): 230-240.
- [26] 刘伟, 孙江浩, 张菊华, 等. 基于 UHPLC-LTQ-Orbitrap 高分辨质谱的黄花菜中化学成分快速鉴定及裂解途径分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 256-264.  
LIU W, SUN JH, ZHANG JH, *et al.* Rapid characterization of chemical profile in daylily flowers and analysis of their fragmentation pathways by UHPLC-LTQ-Orbitrap MSn [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(9): 256-264.
- [27] 支虎明, 王星苏, 赵佳佳, 等. 超高效液相色谱-静电场轨道阱高分辨质谱鉴定核桃仁的脂质构成[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 249-256.  
ZHI HM, WANG XS, ZHAO JJ, *et al.* Lipid analysis of walnut kernel using ultra-high performance liquid chromatography coupled to orbitrap high resolution mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2022, 43(4): 249-256.
- [28] IOANNIS CM, PANAGIOTA AK, GEORGIOS AK, *et al.* Development of analytical strategies for the determination of olive fruit bioactive compounds using UPLC-HRMS and HPLC-DAD. Chemical characterization of Kolovi lesvos variety as a case study [J]. *Molecules*, 2021, 26(23): 7182.
- [29] 谢博, 傅红, 杨方. UPLC-Q-Exactive 四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱联用鉴别掺假蜂蜜[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 244-251.  
XIE B, FU H, YANG F. Identification of adulterated honey by UPLC-Q-Exactive quadrupole-electrostatic field track trap high resolution mass spectrometry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(2): 244-251.
- [30] 聂轶, 单承莺, 刘畅, 等. 南酸枣总黄酮的研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(11): 48-51.  
NIE W, SHAN CY, LIU C, *et al.* Progress of total flavonoids in *Choerospondias axillaris* [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2020, 39(11): 48-51.
- [31] 邱顺姣, 王未名, 林东艺, 等. 柑橘-红茶咀嚼片的研制及其体外模拟消化中酚类化合物稳定性和抗氧化能力的评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 292-300.  
QIU SJ, WANG WM, LIN DY, *et al.* Development of Citrus reticulata Blanco-black tea chewable tablets and evaluation of the stability and antioxidant capacity of phenolic compounds in simulated digestion *in vitro* [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(23): 292-300.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



李红洲, 工程师, 主要研究方向为食品安全与分析检测。

E-mail: hzli27@163.com

国果, 教授, 主要研究方向为食品卫生。

E-mail: guoguojs@163.com

李博岩, 教授, 主要研究方向为食品营养与多组学。

E-mail: Boyan\_Li@163.com