

# UPLC-MS/MS 分析紫薯酒发酵前后 花色苷种类和含量变化

Analysis of anthocyanins in purple sweet potato wine before and  
after fermentation by UPLC-MS/MS

袁江月<sup>1,2</sup> 何佳<sup>1,2</sup> 孙军杰<sup>1,2</sup> 芮蓬<sup>1,2</sup> 刘锡铭<sup>1,2</sup>

YUAN Jiang-yue<sup>1,2</sup> HE Jia<sup>1,2</sup> SUN Jun-jie<sup>1,2</sup> RUI Peng<sup>1,2</sup> LIU Xi-ming<sup>1,2</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 洛阳市微生物发酵工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology,  
Luoyang, Henan 471023, China; 2. Luoyang Engineering and Technology Research  
Center of Microbial Fermentation, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**采用超高效液相色谱—串联四极杆质谱(UPLC-MS/MS)法对紫薯酒关键生产环节中花色苷的种类及含量进行分析。结果表明:共鉴定出 8 种结构差异较大的花色苷,各种花色苷在发酵前后均有不同的变化;高温蒸煮后,紫薯中花色苷种类未发生变化,但花色苷总含量减少;发酵为紫薯酒后,8 种花色苷得率约为 30%。

**关键词:**紫薯酒;花色苷;发酵;超高效液相色谱—串联四极杆质谱

**Abstract:** The type and content of anthocyanins in the key production process of purple sweet potato wine were analyzed by ultra performance liquid chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry (UPLC-MS/MS). Results 8 kinds of anthocyanins with large structural differences were identified, and various anthocyanins had different changes before and after fermentation; after high-temperature cooking, the anthocyanin species in the purple sweet potato did not change, but the total anthocyanin content decreased; After being fermented into purple sweet potato wine, the yield of 8 anthocyanins is about 30%.

**Keywords:** purple sweet potato wine; anthocyanins; fermentation; ultra performance liquid chromatography-tandem quadrupole mass spectrometry

紫薯属于旋花科一年生草本植物,是薯肉颜色为紫色的甘薯,含有丰富的花青素类色素<sup>[1]</sup>。花青素是一类广泛存在于植物中的水溶性色素,属于类黄酮化合物,也是植物的主要呈色物质。自然条件下,游离的花青素常与一个或多个葡萄糖、槐糖和阿拉伯糖等通过糖苷键形成花色苷,而花色苷中的糖苷基和羟基还可以与一个或几个分子的香豆酸、阿魏酸、咖啡酸和对羟基苯甲酸等通过酯键形成酰基化的花色苷<sup>[2]</sup>。因此,紫薯可有效清除人体自由基起到抗衰老的作用<sup>[3]</sup>。

张毅等<sup>[4]</sup>研究发现,不同品种紫薯花色苷含量与组分各不相同且紫薯花色苷均以酰基化的形式存在。朱璐等<sup>[5]</sup>综合评价了浸提法、微波辅助法和超声波辅助法提取的紫薯花色苷的抗氧化活性。Gras 等<sup>[6]</sup>通过在紫薯花色苷中加入氯原酸和玫瑰酸,以及不同剂量的食品级酚类苹果和迷迭香提取物,研究了分子间共色素的定量和定性影响。

目前,常见的花色苷提取方法主要有溶剂提取法、酸性溶剂萃取法、超临界流体法、微波提取法、酶提取法和微生物发酵提取法等<sup>[7]</sup>。而酿造紫薯酒是一种能够较好地提取、利用紫薯花色苷的方法,是酸性溶剂萃取法、酶提取法和微生物发酵提取法的有机结合。但花色苷同时存在易氧化、易分解的特点<sup>[8]</sup>,紫薯酒酿造过程中可能会导致花色苷分解。李甜等<sup>[9]</sup>研究了紫薯酒发酵过程与颜色相关的花色苷含量、褐变指数、聚合色度和总色度变化规律及其相关性等。郭孝萱等<sup>[10]</sup>研究了黑曲霉、米根霉和米曲霉 3 种丝状真菌固态发酵对紫薯中花色苷含量的影响。而有关紫薯花色苷种类与含量在紫薯酒酿造过程

**基金项目:**河南省产学研合作项目(编号:142107000095);大学生研究训练计划项目(编号:2016071)

**作者简介:**袁江月,男,河南科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**何佳(1963—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: hejia@haust.edu.cn

**收稿日期:**2021-01-10

中的变化尚未见报道。文章拟采用 UPLC-MS/MS 法测定紫薯酒酿造过程中花色苷含量的变化,并对不同阶段样品中的花色苷进行定性与定量分析,旨在为紫薯花色苷的开发利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

紫薯:群紫 1 号,市售;

盐酸:分析纯,洛阳吴华化学试剂有限公司;

柠檬酸:分析纯,锦州市向阳化学试剂厂;

酿酒酵母:黄酒专用酵母,安琪酵母股份有限公司;

AB-8 大孔吸附树脂:沧州宝恩吸附材料科技有限公司;

无水乙醇:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

甲醇、甲酸:色谱纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

果胶酶( $\geq 40$  U/mg)、淀粉酶(约  $4 \times 10^4$  U/g)、糖化酶(约  $1 \times 10^5$  U/g):北京奥博星生物技术有限责任公司。

### 1.2 仪器与设备

恒温水浴锅:HH-S4 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

生化培养箱:SPX-250 型,北京市永光明医疗仪器公司;

冷冻离心机:TGL-16M 型,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;

分光光度计:UV-2100 型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

超声清洗仪:KQ-500DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

旋转蒸发仪:RE52-86A 型,上海亚荣生化仪器厂;

电子天平:YP602N 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

酸度计:PHS-25 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

高压蒸汽灭菌锅:YXQ-LS50SII 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;

超高效液相色谱—串联四极杆质谱联用仪:Waters H-Class TQ-S Micro 型,沃特世科技(上海)有限公司。

### 1.3 样品制备

**1.3.1 紫薯花色苷浓缩液制备** 根据文献[11]修改如下:将 100 g 生紫薯和经高温蒸煮的 100 g 熟紫薯(蒸锅中上汽后再蒸煮 20 min 至完全熟透)分别与酸化乙醇( $V_{1.5 \text{ mol/L HCl}} : V_{95\% \text{ 乙醇}} = 15 : 85$ )按  $m_{\text{紫薯}} : V_{\text{酸化乙醇}} = 1 : 12$  (g/mL) 打浆,60 °C 超声浸提 40 min,4 层尼龙纱布过滤,4 °C、10 000 r/min 离心 20 min,上清液真空旋转蒸发,除去乙醇,经 AB-8 大孔树脂纯化,蒸馏水冲洗除去糖、无机盐等杂质,用 80% 乙醇于 25 °C、100 r/min 摇床中洗脱 1 h,重复 3 次,真空旋转蒸发得花色苷浓缩液,定容至 50 mL。

**1.3.2 紫薯酒花色苷浓缩液制备** 根据文献[12]修改如

下:将熟紫薯清洗去皮并挑选 100 g,按  $m_{\text{紫薯}} : m_{\text{蒸馏水}} = 1 : 1$  加水打浆 10 min,用柠檬酸调节 pH 至 6.5,加入 0.1% 淀粉酶液化,90 °C 水浴 90 min;液化后降温至 60 °C,调节 pH 至 4.5,加入 0.1% 糖化酶糖化,60 °C 水浴 80 min;糖化后冷却至室温,调节 pH 至 6.0,将黄酒专用酵母接种至制备好的紫薯浆液中,接种量 0.3%,活化水温 35~38 °C,活化 15 min 后,将水温降至 30~32 °C,于 26 °C 发酵 7 d。发酵结束后处理同 1.3.1。

### 1.4 指标测定

#### 1.4.1 液相色谱—质谱联用测定条件

(1) 色谱条件:根据文献[13]并修改。色谱柱为 Waters BEH  $C_{18}$  柱(2.1 mm  $\times$  50 mm, 1.7  $\mu\text{m}$ ),进样体积 2  $\mu\text{L}$ ,柱温 25 °C,流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液;流动 B 为 100% 甲醇;梯度洗脱条件:0~10 min,95%~70% A;10~25 min,70%~65% A;25~30 min,10% A;30~32 min,95% A;32~35 min,95% A。流速 0.1 mL/min。

(2) 质谱条件:根据文献[14]并修改。扫描模式 ES+;扫描范围 700~1 200 ( $m/z$ );扫描时间 0.5 s;毛细管电压 3 000 V;锥孔电压 20 V;离子源温度 150 °C;脱溶剂气温度 500 °C,流量 1 000 L/h;锥孔反吹气流量 50 L/h;二级质谱碰撞能量 25 V;离子扫描范围 200~1 200 ( $m/z$ ),正离子模式。

#### 1.4.2 花色苷定性及定量方法

(1) 定性方法:结合相对保留时间、一级质谱分子离子和二级质谱碎片离子,推测花色苷种类。

(2) 定量方法:采用峰面积法。

**1.4.3 数据处理** 使用 MassLynx® 软件得到色谱图数据点及各花色苷峰面积积分,使用 Origin 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 花色苷种类

**2.1.1 花色苷总离子流图** 图 1 为不同处理阶段紫薯花色苷浓缩液的总离子流图。

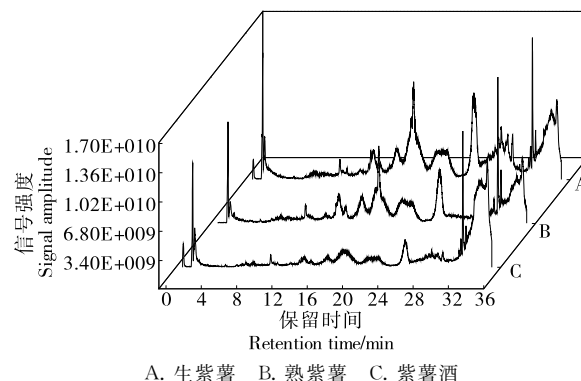


图 1 紫薯花色苷浓缩液总离子流图

Figure 1 Total ion current chromatograms of anthocyanin concentrate of purple sweet

2.1.2 花色苷的鉴定 通过样品一级质谱确认,蒸煮和发酵前后样品中均含有  $m/z$  为 893,907,935,949,1 069,1 097,1 111,1 125 的花色苷,分别以组分 1,2,3,4,5,6,7,8 命名,并通过对各组分一级质谱的分子离子和二级质谱的碎片离子进行分析,推断花色苷的种类。

由图 3、图 4 可知,组分 1 的保留时间为 12.25 min,其分子离子  $m/z$  893 二级质谱有 3 个碎片离子,分别为  $m/z$  287, 449,731,与 Tian 等<sup>[15]</sup>的结论相同,因此  $m/z$  287 可以认定为矢车菊素; $m/z$  449 可以认定为失去一

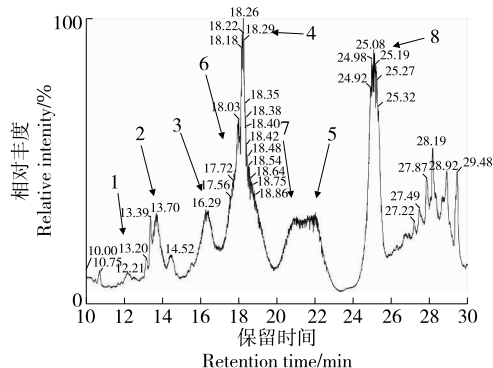


图 2 生紫薯花色苷出峰时间分布图

Figure 2 Distribution map of anthocyanin peak time of raw purple potato

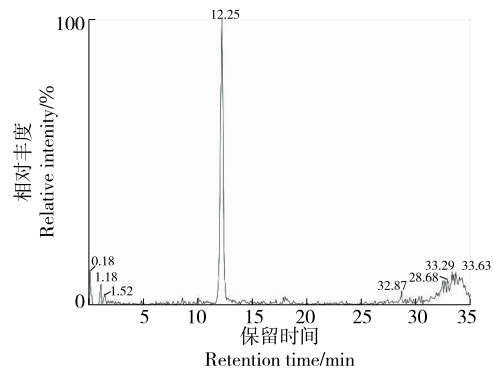


图 3 组分 1 一级质谱图

Figure 3 Primary mass spectrum of component 1

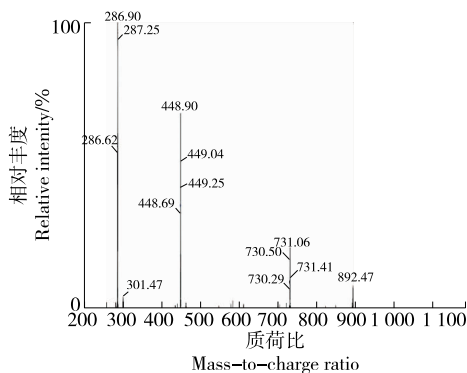


图 4 组分 1 二级质谱图

Figure 4 Secondary mass spectrum of component 1

分子槐糖和一分子对羟基苯甲酸 $[M-324-120]^+$ 得到的碎片; $m/z$  731 可以认定为失去一分子葡萄糖 $[M-162]^+$ 得到的碎片。组分 1 可以认定为矢车菊素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷。

由图 5、图 6 可知,组分 2 的保留时间为 13.77 min,其分子离子  $m/z$  907 二级质谱有 3 个碎片离子,分别为  $m/z$  301,463,745,与 Tian 等<sup>[15]</sup>的结论相同,因此  $m/z$  301 可以认定为芍药素; $m/z$  463 可以认定为失去一分子槐糖和一分子对羟基苯甲酸 $[M-324-120]^+$ 得到的碎片; $m/z$  745 可以认定为失去一分子葡萄糖 $[M-162]^+$ 得到的碎片。组分 2 可以认定为芍药素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷。

由图 7、图 8 可知,组分 3 的保留时间为 16.37 min,其分子离子  $m/z$  935 二级质谱有 3 个碎片离子,分别为  $m/z$  287,449,773,与 Suda 等<sup>[16]</sup>的结论相同,因此  $m/z$  287 可以认定为矢车菊素; $m/z$  449 可以认定为失去一分子槐糖和一分子咖啡酸 $[M-324-162]^+$ 得到的碎片; $m/z$  773 可以认定为失去一分子葡萄糖 $[M-162]^+$ 得到的碎片。组分 3 可以认定为矢车菊素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷。

由图 9、图 10 可知,组分 4 的保留时间为 18.31 min,其分子离子  $m/z$  949 二级质谱有 3 个碎片离子,分别为

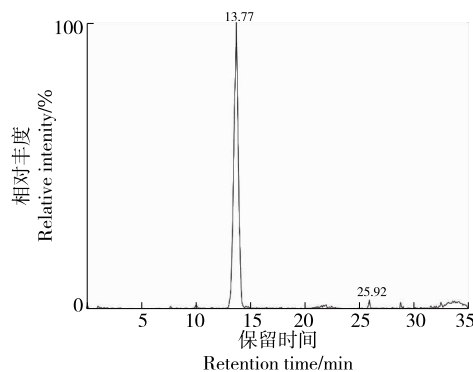


图 5 组分 2 一级质谱图

Figure 5 Primary mass spectrum of component 2

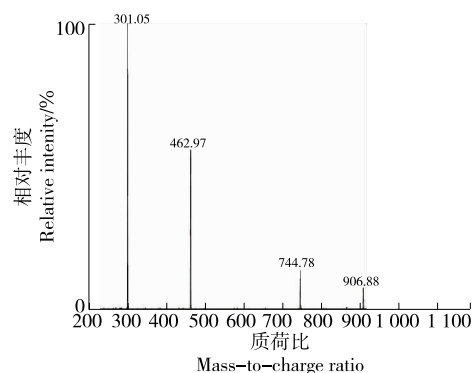


图 6 组分 2 二级质谱图

Figure 6 Secondary mass spectrum of component 2

$m/z$  301, 463, 787, 与 Tian 等<sup>[15]</sup> 的结论相同, 因此  $m/z$  301 可以认定为芍药素;  $m/z$  463 可以认定为失去一分子槐糖和一分子咖啡酸  $[M-324-162]^+$  得到的碎片;  $m/z$  787 可以认定为失去一分子葡萄糖  $[M-162]^+$  得到的碎片。组分 4 可以认定为芍药素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷。

由图 11、图 12 可知, 组分 5 的保留时间为 22.11 min, 其分子离子  $m/z$  1 069 二级质谱有 3 个碎片离子, 分别为  $m/z$  301, 463, 907, 与 Islam 等<sup>[17]</sup> 的结论相同, 因此  $m/z$  301 可以认定为芍药素;  $m/z$  463 可以认定为失去一分子

槐糖、一分子咖啡酸和一分子对羟基苯甲酸  $[M-324-162-120]^+$  得到的碎片;  $m/z$  907 可以认定为失去一分子葡萄糖  $[M-162]^+$  得到的碎片。组分 5 可以认定为芍药素 3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷。

由图 13、图 14 可知, 组分 6 的保留时间为 17.76 min, 其分子离子  $m/z$  1 097 二级质谱有 3 个碎片离子, 分别为  $m/z$  287, 449, 935, 与 Tian 等<sup>[15]</sup> 的结论相同, 因此  $m/z$  287 可以认定为矢车菊素;  $m/z$  449 可以认定为失去一分子槐糖和两分子咖啡酸  $[M-324-162 \times 2]^+$  得到的碎片;  $m/z$  935 可以认定为失去一分子葡萄糖  $[M-162]^+$  得到

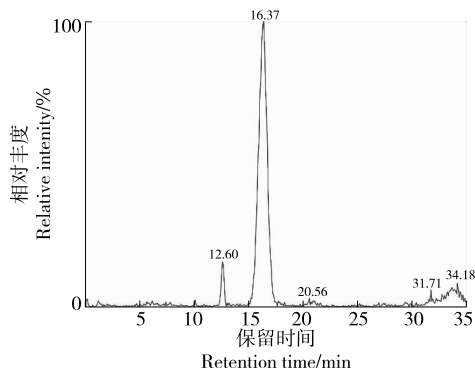


图 7 组分 3 一级质谱图

Figure 7 Primary mass spectrum of component 3

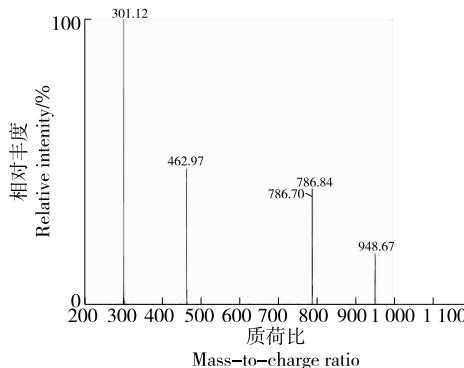


图 10 组分 4 二级质谱图

Figure 10 Secondary mass spectrum of component 4

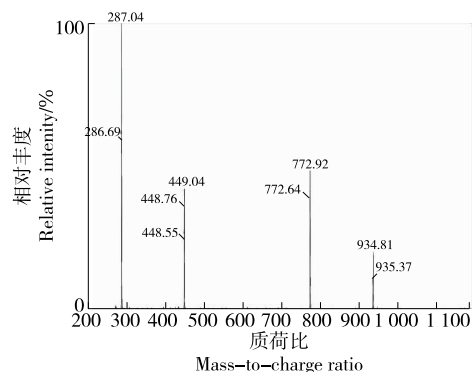


图 8 组分 3 二级质谱图

Figure 8 Secondary mass spectrum of component 3

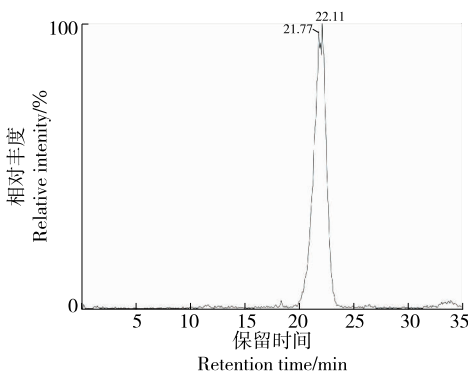


图 11 组分 5 一级质谱图

Figure 11 Primary mass spectrum of component 5

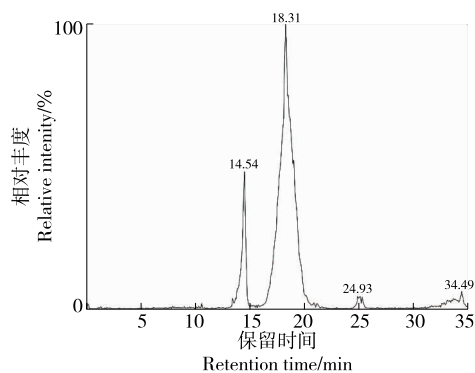


图 9 组分 4 一级质谱图

Figure 9 Primary mass spectrum of component 4

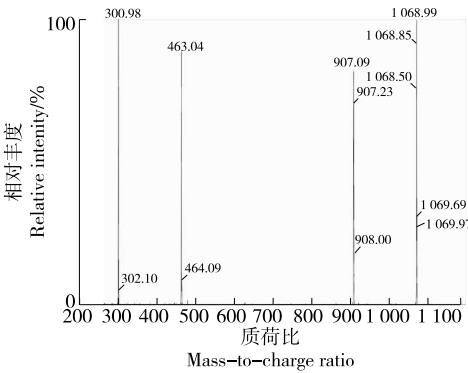


图 12 组分 5 二级质谱图

Figure 12 Secondary mass spectrum of component 5

的碎片。组分 6 可以认定为矢车菊素 3-(6'',6'''-双咖啡酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷。

由图 15、图 16 可知,组分 7 的保留时间为 20.87 min,其分子离子  $m/z$  1 111 二级质谱有 3 个碎片离子,分别为  $m/z$  287,449,949,与 Suda 等<sup>[16]</sup>的结论相同,因此  $m/z$  287 可以认定为矢车菊素; $m/z$  449 可以认定为失去一分子槐糖、一分子阿魏酸和一分子咖啡酸  $[M-324-176-162]^+$  得到的碎片; $m/z$  949 可以认定为失去一分子葡萄糖  $[M-162]^+$  得到的碎片。组分 7 可以认定为矢车菊素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖)-5-葡萄糖苷。

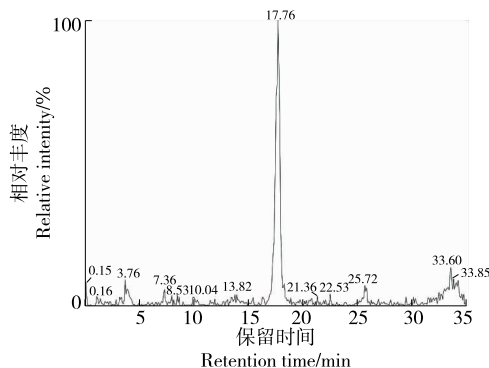


图 13 组分 6 一级质谱图

Figure 13 Primary mass spectrum of component 6

由图 17、图 18 可知,组分 8 的保留时间为 25.15 min,其分子离子  $m/z$  1 125 有 3 个碎片离子,分别为  $m/z$  301,463,963,与 Suda 等<sup>[16]</sup>的结论相同,因此  $m/z$  301 可以认定为芍药素; $m/z$  463 可以认定为失去一分子槐糖、一分子阿魏酸和一分子咖啡酸  $[M-324-176-162]^+$  得到的碎片; $m/z$  963 可以认定为失去一分子葡萄糖  $[M-162]^+$  得到的碎片。组分 8 可以认定为芍药素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖)-5-葡萄糖苷。

由表 1 可知,在酰化基团和糖基相同或类似的情况下,矢车菊素花色苷的保留时间小于芍药素花色苷的,与

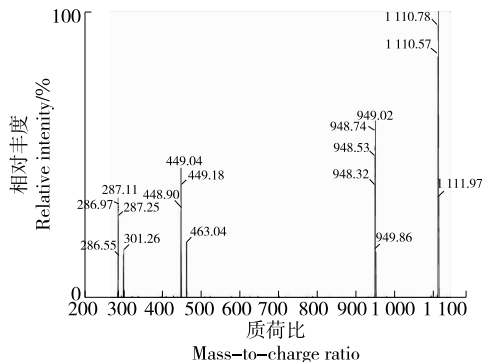


图 16 组分 7 二级质谱图

Figure 16 Secondary mass spectrum of component 7

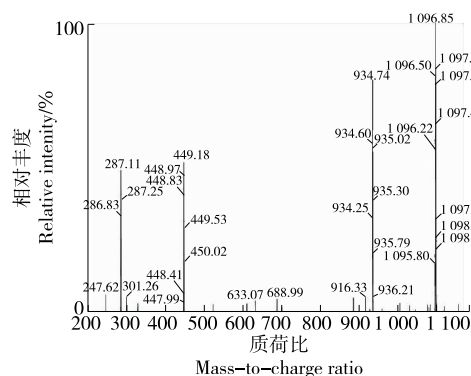


图 14 组分 6 二级质谱图

Figure 14 Secondary mass spectrum of component 6

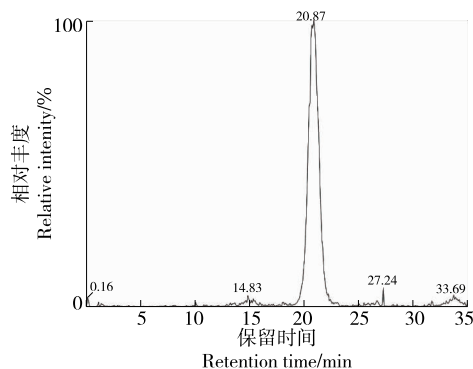


图 15 组分 7 一级质谱图

Figure 15 Primary mass spectrum of component 7

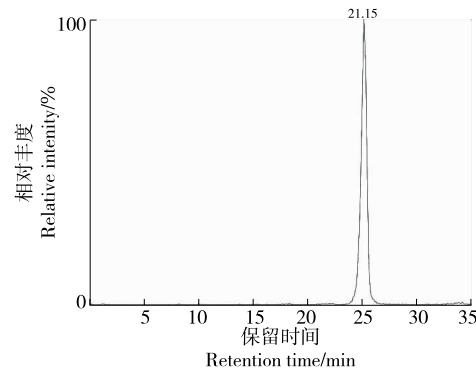


图 17 组分 8 一级质谱图

Figure 17 Primary mass spectrum of component 8

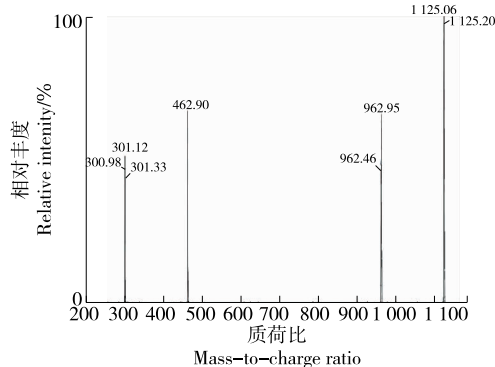


图 18 组分 8 二级质谱图

Figure 18 Secondary mass spectrum of component 8

表 1 花色苷指认汇总表  
Table 1 Summary identification of anthocyanins

| 组分 | 保留时间/min | MS( <i>m/z</i> ) | MS/MS( <i>m/z</i> ) | 花色苷指认                               |
|----|----------|------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 1  | 12.25    | 893              | 287,449,731         | 矢车菊素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷             |
| 2  | 13.77    | 907              | 301,463,745         | 芍药素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷              |
| 3  | 16.37    | 935              | 287,449,773         | 矢车菊素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷                |
| 4  | 18.31    | 949              | 301,463,787         | 芍药素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷                 |
| 5  | 22.11    | 1 069            | 301,463,907         | 芍药素 3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷          |
| 6  | 17.76    | 1 097            | 287,449,935         | 矢车菊素 3-(6'',6'''-双咖啡酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷    |
| 7  | 20.87    | 1 111            | 287,449,949         | 矢车菊素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷 |
| 8  | 25.15    | 1 125            | 301,463,963         | 芍药素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷  |

Truong 等<sup>[18]</sup>的结果一致,符合花色苷在 UPLC 图谱中的分配规律。此外,Tian 等<sup>[15-17]</sup>还检测出了 *m/z* 773 矢车菊素 3-槐糖苷-5-葡萄糖苷等多种花色苷,而试验未检测到,可能与品种、产地等差异有关<sup>[4]</sup>。

2.2 花色苷含量变化

由图 19 可知,紫薯发酵为紫薯酒后有 8 种花色苷发生了变化,组分 1 矢车菊素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷最终得率为 33%;组分 2 芍药素 3-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷最终得率为 31%;组分 3 矢车菊素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷最终得率为 31%;组分 4 芍药素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷最终得率为 45%;组分 5 芍药素 3-咖啡酰-对羟基苯甲酰槐糖苷-5-葡萄糖苷最终得率为 28%;组分 6 矢车菊素 3-(6'',6'''-双咖啡酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷最终得率为 26%;组分 7 矢车菊素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷最终得率为 28%;组分 8 芍药素 3-(6''-咖啡酰-6'''-阿魏酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷最终得率为 28%。

由图 19 还可知,经高温蒸煮工艺,紫薯中花色苷种类未发生变化,但花色苷含量减少,可能是部分花色苷受热分解。其中减少得最多的为组分 4 芍药素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷,表明其热稳定性较差;减少得最少的为组分 3 矢车菊素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷,表明其热稳定性较好。刘海英等<sup>[19]</sup>研究表明,紫薯花色苷的热降解符

合一级反应动力学模型,随着温度的升高,紫薯花色苷降解速率明显加快。此外,蒸煮后部分花色苷提取率有所升高,具体原因有待进一步研究。紫薯发酵为紫薯酒后,8 种花色苷得率约为总量的 30%,与梁敏等<sup>[20]</sup>的结果相近。发酵后紫薯酒中提取量最多的花色苷为组分 4 芍药素 3-咖啡酰槐糖苷-5-葡萄糖苷,提取量最少的为组分 6 矢车菊素 3-(6'',6'''-双咖啡酰槐糖苷)-5-葡萄糖苷。

3 结论

采用超高效液相色谱—串联四极杆质谱法对紫薯酒发酵前后的花色苷种类及含量进行了分析。结果表明:紫薯酒中共鉴定出 8 种花色苷,高温蒸煮会使部分花色苷受热分解,而酿造紫薯酒可以有效从紫薯中提取花色苷;经高温蒸煮和 7 d 发酵后,8 种花色苷最终得率为 26%~45%。此外,发酵后花色苷未完全提取,这可能与浸提时间不足、花色苷易分解以及酵母菌的吸附作用等因素有关,具体原因有待进一步研究。

参考文献

[1] 刘欣. 紫薯系列产品的加工[J]. 农村百事通, 2019(7): 42-43.  
[2] 于洪建, 董晋泉. 浅谈花青素功效[J]. 现代中医药(北京), 2007(3): 67-70.  
[3] 赵二劳, 闫唯, 高子怡, 等. 紫薯色素提取工艺及其功能活性研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 192-195.  
[4] 张毅, 孔秀林, 王洪云, 等. 不同品种紫甘薯花色苷含量与组分分析[J]. 江苏师范大学学报(自然版), 2019, 37(2): 26-30.  
[5] 朱璐, 董福, 冯叙桥, 等. 浸提法、超声波法和微波法提取紫薯花色苷的抗氧化性比较研究[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 83-88.  
[6] GRAS C C, NEMETZ N, CARLE R, et al. Anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) and their color modulation by the addition of phenolic acids and food-grade phenolic plant extracts[J]. Food Chemistry, 2017, 235: 265-274.  
[7] 徐颖, 樊凡, 阴鹏涛, 等. 紫薯花青素超声波辅助酶法提取工艺优化及其抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 150-154.

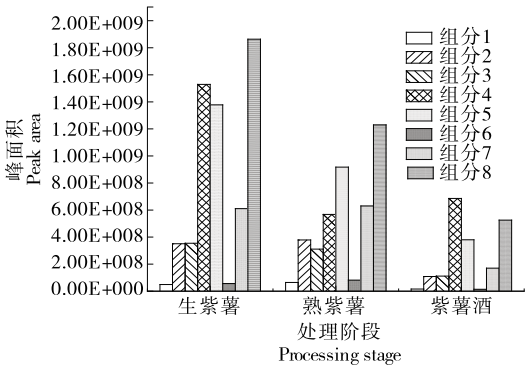


图 19 花色苷峰面积变化趋势图

Figure 19 Variation trend of anthocyanin peak area

(下转第 68 页)

- 合涂膜保鲜剂的配方[J]. 中国野生植物资源, 2018, 37(3): 27-33.
- [2] 徐立伟, 马佳慧, 于森. 香榧的营养和功能成分研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 210-214.
- [3] 田鑫, 穆文碧, 张建永. 香榧不同部位的化学成分和药理活性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(4): 691-715, 637.
- [4] 孙小红, 王国夫, 周瑾. 超声波法提取香榧籽油工艺及其理化特性[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 38-41.
- [5] NI Qin-xue, GAO Qian-xin, YU Wei-wu, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of oils from two *Torreya grandis* varieties seeds and their physicochemical and antioxidant properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 1 226-1 234.
- [6] 冯孝杰, 沈倩婷, 孙小红, 等. 响应面法优化纤维素酶提取香榧假种皮多酚类物质[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 54-59.
- [7] 陈盛. 施肥, 坡向, 林龄对香榧叶片碳氮磷化学计量及精油成分的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- [8] 敬思群, 王德萍, 周苗苗, 等. 茴香精油微胶囊在辣椒丝中的应用[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 283-288.
- [9] 江学平, 陈文煊, 邵海燕. 香榧假种皮提取物的研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(3): 54-58.
- [10] 王晶晶. 香榧叶片精油成分变异特点及代谢物对养分调控的响应机制[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [11] BELOUSOVA N I, DOMRACHEV D V, FURSA N S, et al. Composition of essential oil from *rhododendron caucasicum*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2017, 53(3): 574-575.
- [12] MALAKA Mpho Sandra, NAIDOO Kersch, KABUBA John. Extraction of *siphonochilus aethiopicus* essential oil by steam distillation[J]. Chemical Engineering Communications, 2017, 204(7): 813-819.
- [13] 苏瑾, 潘兆平, 肖媛, 等. 玳玳花精油的成分及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 165-170.
- [14] 曹雪丹, 方修贵, 李二虎, 等. 宽皮橘精油挥发性成分的电子鼻和 GC-MS 分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 48-53.
- [15] 蒋书歌, 侯宇豪, 刘坚, 等. 柑橘精油纳米乳的制备及对金黄色葡萄球菌的抑制活性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 144-149.
- [16] 刘洋, 吉燕华, 雒昕昕, 等. 柠檬烯应用的研究现状[J/OL]. 中药药理与临床. [2021-06-08]. <https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyi.20210607.002>.
- [17] 李娜, 刘小杰, 梅俊, 等. 药食同源植物精油在食品保鲜中的应用进展[J/OL]. 食品与发酵工业. [2021-06-08]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026689>.
- [18] 黄苏婷, 杭方学, 陆海勤, 等. 水果挥发性香气成分研究进展[J]. 轻工科技, 2019, 35(2): 1-4.
- [19] PANJAITAN R, MAHFUD M, CAHYATIE D, et al. The study of parameters of essential oil extraction from black pepper seed using microwave hydrodistillation by modeling[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 749(1): 012032.
- [20] 张凤兰, 贾利霞, 杨忠仁, 等. 沙芥果实精油提取工艺优化及 GC-MS 分析[J/OL]. 食品研究与开发. [2021-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20210408.0916.002.html>.
- [21] 于勇杰, 张晶, 戴智慧, 等. 不同方法提取香榧假种皮提取物成分的 GC-MS 分析[J]. 核农学报, 2014(8): 1 421-1 429.
- (上接第 61 页)
- [8] 江玉婷, 秦昉, 陈洁, 等. 天然花色苷色素稳定化研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 213-218, 236.
- [9] 李甜, 王越, 安家彦. 紫薯酒发酵过程颜色变化规律及颜色特征[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 48-52.
- [10] 郭孝萱, 柳嘉, 陆雪娇, 等. 紫薯发酵前后总酚、总黄酮、花色苷、抗氧化性和抗癌作用比较[J]. 中国食品学报, 2017, 17(3): 289-295.
- [11] 魏好程, 米聪, 王瑞芳, 等. 大孔树脂吸附法纯化紫薯花色苷的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(8): 3 186-3 191.
- [12] 于聪, 李艳. 响应面法优化紫甘薯发酵酒的工艺条件[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(11): 133-140.
- [13] 陈文, 裴彰明, 刘晓宇, 等. LC-MS/MS 分析测定紫薯花色苷方法研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(3): 191-194.
- [14] 王昶森, 杨志伟, 刘亚新, 等. UPLC-MS/MS 方法在葡萄酒花色苷鉴定过程中对两种锦葵色素同分异构体的分离[J]. 酿酒科技, 2018(6): 72-75.
- [15] TIAN Q, KONCZAK I, SCHWARTZ S J. Probing anthocyanin profiles in purple sweet potato cell line (*Ipomoea batatas* L. Cv. Ayamurasaki) by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(16): 6 503-6 509.
- [16] SUDA I, OKI T, MASUDA M, et al. Physiological functionality of purple-fleshed sweet potatoes containing anthocyanins and their utilization in foods[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2014, 37(3): 167-173.
- [17] ISLAM M S, YOSHIMOTO M, TERAHARA N, et al. Anthocyanin compositions in sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) leaves[J]. Bioscience Biotechnology & Biochemistry, 2014, 66(11): 2 483-2 486.
- [18] TRUONG V D, DEIGHTON N, THOMPSON R T, et al. Characterization of anthocyanins and anthocyanidins in purple-fleshed sweet potatoes by HPLC-DAD/ESI-MS/MS[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(1): 404-410.
- [19] 刘海英, 邢子毅, 王加华, 等. 不同有机酸体系中紫薯花色苷热降解稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 320-324, 334.
- [20] 梁敏, 包怡红. 蓝靛果酒发酵工艺优化及发酵过程对花色苷的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 151-157.