

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80333

# 藕粉中呈色成分的分析与鉴定

张愉含 辛晓宾 杨成 闵瑞 史良曼

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** [目的] 对藕粉呈色物质进行分析和鉴定, 明确藕粉冲泡颜色不同的原因及颜色变化规律。[方法] 以 5 种市售藕粉为原料, 通过酸碱显色反应及紫外—可见光(UV-Vis)光谱初步判定呈色物质, 采用 UPLC-Q-TOF-MS 和傅里叶红外光谱测定其组成和结构单元。[结果] 藕粉中呈色物质为原花青素, 主要组成是以儿茶素、表儿茶素为主的低聚原花青素, 相对分子质量普遍 < 896, 主要结构单元为(-)-表儿茶素。5 种市售藕粉的原花青素含量为 0.080~0.150 mg/g, 高含量(0.147 mg/g)样品中花青素、总多酚、总黄酮含量分别为(0.001 1±0.000 3) mg/g 藕粉、(0.262±0.003) mg 没食子酸当量(GAE)/g 藕粉和(0.348±0.008) mg/g 藕粉。[结论] 藕粉颜色差异主要与原花青素含量以及样品贮藏温度和时间相关。

**关键词:** 藕粉; 呈色物质; 原花青素; 黄酮; 总多酚; 高效液相色谱—四极杆飞行时间质谱

## Analysis and identification of chromogenic components in lotus root powder

ZHANG Yuhan XIN Xiaobin YANG Cheng MIN Rui SHI Liangman

(School of Food Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze and identify the coloring components in lotus root powder, clarify the reasons for the different colors of lotus root powder, and analyze the color variation patterns during brewing. [Methods] Five commercially available lotus root powder samples are analyzed. Acid-base chromogenic reactions and ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy are employed to preliminarily identify the chromogenic components. Ultra-high performance liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-MS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) are used to determine their composition and structural units. [Results] The chromogenic components in lotus root powder are identified as proanthocyanidins, primarily oligomeric proanthocyanidins composed of catechins and epicatechins, with relative molecular weights predominantly below 896. The main structural unit is (-)-epicatechin. The proanthocyanidin content in the five commercially available samples ranges from 0.080 to 0.150 mg/g. In the high-content sample (0.147 mg/g), the levels of anthocyanins, total polyphenols, and total flavonoids are (0.001 1±0.000 3), (0.262±0.003) mg GAE/g, and (0.348±0.008) mg/g, respectively. [Conclusion] The color differences in lotus root powder are primarily attributed to proanthocyanidin content and storage conditions (temperature and duration).

**Keywords:** lotus root powder; chromogenic component; proanthocyanidin; flavonoid; total polyphenol; UPLC-Q-TOF-MS

目前, 市场上的莲藕制品主要有藕粉、莲藕酸奶<sup>[1]</sup>、莲藕汁饮品<sup>[2]</sup>、白莲藕酒<sup>[3]</sup>等, 其中, 藕粉多由新鲜莲藕经研磨、冲洗、干燥制得, 每 100 g 藕粉中约含 65 g 淀粉。藕粉不仅食用方便, 口感清新, 还易于消化, 特别适合产妇、儿

童和老年人等群体食用, 是一种受欢迎的食品<sup>[4]</sup>。在藕粉实际生产和食用过程中, 不同品牌的藕粉会呈现出不同的颜色, 如黄色、灰色、粉色(樱花色)和棕色等, 但其呈色物质未知。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(编号: 31901654); 江苏省青年科技基金项目(编号: BK20190592)

**通信作者:** 杨成(1987—), 女, 江南大学副研究员, 博士。E-mail: cheng.yang@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:** 2025-04-29 **改回日期:** 2025-09-25

**引用格式:** 张愉含, 辛晓宾, 杨成, 等. 藕粉中呈色成分的分析与鉴定[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 13-20.

**Citation:** ZHANG Yuhan, XIN Xiaobin, YANG Cheng, et al. Analysis and identification of chromogenic components in lotus root powder [J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 13-20.

藕粉中含有丰富的矿物质(如 K、Fe 等)<sup>[5-6]</sup>、氨基酸以及典型的淀粉颗粒形态<sup>[7]</sup>。由于不同品牌和产地藕粉的冲泡颜色不同,推测藕粉的呈色与制备藕粉所用藕的部位、藕的新鲜程度以及藕粉中其他配料和不同含量的营养成分相关<sup>[8-9]</sup>。

目前,关于藕粉的研究主要集中于藕粉的营养价值<sup>[10-11]</sup>和加工工艺<sup>[12-17]</sup>,对藕粉中呈色物质的研究较少。Chen 等<sup>[8]</sup>研究表明,铁离子对藕片水煮后颜色变化有影响,在生切放置一段时间以及水煮后,铁离子会使藕片颜色变深并呈现蓝紫色,但该研究未涉及藕粉的粉红色以及黄色的呈色物质研究,无法证明藕粉的冲泡色与铁离子相关。此外,藕粉的原材料来自藕,即荷花的根部,因此通过检索常见莲花或荷花的色素成分,了解莲花或荷花的呈色物质,进而可以推测藕粉的呈色物质。袁明霞等<sup>[18]</sup>研究了红色系、紫色系、蓝色系和白色系重瓣铁线莲,发现芍药素和矢车菊素可能与莲的红色相关,同时,花青素的总含量差异也会导致花瓣颜色不同。Liu 等<sup>[19]</sup>发现了莲花花瓣变色的化学机制,并在“秋三色”莲品种花瓣中检测到 5 种花青素成分,由此猜测 5 种花青素成分的退化会导致莲花颜色从红色到白色的转变。因此,初步推测藕粉的颜色可能与花青素或花色苷及其他多酚化合物有关。然而,使用市售的 5 种藕粉进行冲泡并加入酸碱测试颜色发现,藕粉遇到酸和碱后会呈现不同颜色,与接近中性的藕粉呈色不同,但花青素或花色苷遇到酸碱试剂后的变色规律与所报道的任何一种花青素的变色规律均相反。藕粉中呈色物质遇到酸会呈现淡蓝绿色,遇到碱会呈现浅棕色,这与常见花青素遇到酸碱后的变色规律相反,因此,最终推测藕粉中呈色物质可能不是铁离子和花青素,而是其他成分。

试验拟以 5 种市售藕粉为研究对象,探究藕粉的呈色物质,分析其物理化学性质并鉴定其组成;检测并比较市售藕粉中的主要营养物质(包括总多酚、总黄酮、原花青素和花青素等)含量,最终明确藕粉中呈色物质的组成,为藕粉质量评价和冲泡颜色调控以及藕粉应用开发提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

4-二甲基氨基肉桂醛:上海泰坦科技股份有限公司;  
没食子酸标准品、原花青素标准品、AB-8 大孔吸附树脂:上海迈瑞尔生化科技有限公司;

芦丁标准品、原花青素 B2:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

氯化钾、六水合硝酸铝、亚硝酸钠、三水合醋酸钠、碳酸钠、甲醇、盐酸、醋酸、氢氧化钠、无水乙醇、Folin-

Ciocalteu 试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

SJZ、MMHM、YX、HQ 和 FR 藕粉:依次编号样品 1~5,市售;

超纯水:无锡江大教育文化服务有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

低速离心机:TD5-II 型,长沙平凡仪器仪表有限公司;

电子秤:YHC-A6 型,上海英衡电子秤有限公司;

傅利叶红外(FTIR)光谱仪:IS10 型,美国 Nicolet 公司;

电子天平:ME204E 型,瑞士梅特勒-托利多公司;

分析天平:MS105 型,瑞士梅特勒-托利多公司;

旋转蒸发仪:RV8 型,德国 IKA 公司;

Kinetex C<sub>18</sub> 色谱柱:5 μm, 250 mm×10 mm,美国 Phenomenex 公司;

超高效液相串联四极杆飞行时间质谱联用仪:UPLC-TQD 型,美国 Waters 公司;

冷冻干燥机:α1-2 Ldplus 型,德国 Martin Christ 公司;

紫外-可见分光光度计:UV-1800 型,日本岛津公司。

## 1.2 方法

1.2.1 藕粉色素的提取 参照祝波等<sup>[20]</sup>的方法并修改。准确称量 120 g 藕粉,加入 480 mL 体积分数为 70% 乙醇,50 °C 振荡 30 min,50 °C、200 W 超声 30 min,料液比为 1:12 (g/mL),重复操作 3 次,抽滤 3 次,得到藕粉色素提取液。50 °C、100 r/min 真空旋转蒸发,浓缩,得到藕粉提取浓缩液。8 000 r/min 离心 10 min,取上清液于培养皿中,冰箱过夜直至冻成冰,冷冻干燥 48 h,得到藕粉色素提取物粉末。

#### 1.2.2 藕粉呈色物质的初步分析

(1) 不同酸碱度下藕粉溶液颜色:从 5 份样品中各取 9 g 藕粉,加入少量冷水搅匀,加入开水冲泡,制得 300 mL 藕粉溶液。将其平均分为 3 份,每份 90 mL。向藕粉溶液中分别滴加 4 滴 1 mol/L HCl、纯净水、1 mol/L NaOH,搅拌均匀,对比 3 份藕粉溶液的颜色变化。其余藕粉溶液测定其 pH,判断颜色深浅与 pH 的相关性。

(2) 紫外-可见吸收光谱法:以 70% 乙醇溶液为空白对照,于 200~800 nm 范围内用紫外-可见分光光度计对 5 种样品的藕粉色素提取液进行全波长扫描,确定最大吸收波长,观察吸收光谱走向。

#### 1.2.3 藕粉中呈色物质鉴定

(1) 紫外-可见分光光度图谱:以样品 3 的提取浓缩液为例,用 1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 将 3 mL 藕粉提取浓缩液调至 pH 分别为 1.0~13.0,共 13 个,定容至 10 mL。以 70% 乙醇为空白对照,于 200~800 nm 范围内用紫外-可见分光光度计进行全波长扫描。

(2) 藕粉提取浓缩液的颜色变化:以样品3的提取浓缩液为例,分别取0.5 mL藕粉色素浓缩液于13个总体积为4 mL的透明玻璃瓶中,用1 mol/L HCl和1 mol/L NaOH分别配制15 mL pH为1.0~13.0的水溶液。加入2 mL不同pH的溶液,获得pH 1.0~13.0的藕粉提取浓缩液,观察其颜色变化。

(3) 高温对藕粉提取浓缩液颜色的影响:将pH为1.0~13.0的藕粉色素提取浓缩液于70 °C水浴锅中密封避光保温1 h,观察其颜色变化。

(4) 藕粉提取浓缩液与原花青素标准品在酸碱环境下的颜色变化:取6支试管,分为两组,一组加入2 mL藕粉色素浓缩液,另一组加入2 mL 1 mg/mL原花青素标准品溶液,两组溶液中依次滴加3滴1 mol/L HCl、纯净水、1 mol/L NaOH,观察其在不同酸碱条件下的颜色变化。

1.2.4 藕粉中原花青素的提取分离 参照孙芸等<sup>[21-22]</sup>的方法并修改。采用AB-8大孔树脂对原花青素浓缩液进行纯化处理。纯化条件:样品溶液质量浓度1 mg/mL,上样速率2 mL/min,5倍上样体积;洗脱液流速2 mL/min,采用体积分数为20%~80%的乙醇溶液进行梯度洗脱,2倍上样体积。分离出4组不同浓度的洗脱样品,分别命名为F20、F40、F60和F80。

1.2.5 UPLC-Q-TOF-MS 鉴定藕粉中原花青素组成 利用UPLC-Q-TOF-MS联用技术对纯化后的样品进行分析,以鉴定原花青素的结构特征并评估其纯度<sup>[23]</sup>。色谱柱为Waters BEH C<sub>18</sub>流动相A为乙腈,流动相B为0.1%甲酸—水溶液。洗脱流速0.3 mL/min,柱温45 °C,进样量5 μL。在200~400 nm范围内对信号响应进行监测。梯度洗脱程序:100% B,40 min;70% B,5 min;20% B,5 min;0% B,5 min;100% B,55 min。质谱分析条件:采用电喷雾电离(ESI)的负离子模式,毛细管电压3.0 kV,锥孔电压20/50 V,离子源100 °C,脱溶剂气体温度400 °C,碰撞能量6 eV,碰撞质量扫描范围50~1 000 m/z,电压1 800 V。

1.2.6 傅里叶红外光谱(FT-IR)测定藕粉中原花青素结构 将藕粉色素浓缩液于4 000~500 cm<sup>-1</sup>范围内进行红外光谱扫描,重复32次,分辨率为4。测定前,先对大气进行背景扫描,以确保分析结果的准确性。

1.2.7 原花青素总量测定 参照黄雪松等<sup>[24]</sup>的方法,标准曲线方程为 $y=0.0019x-0.0184$ ( $R^2=0.9992$ )。

1.2.8 花青素总量检测 参照李建伟<sup>[25]</sup>的方法,按式(1)计算花青素总含量。

$$C = \frac{A \times M_w \times DF \times 10^3}{\epsilon \times l} \quad (1)$$

式中:

$C$ ——花青素总含量,mg/L;

$\epsilon$ ——矢车菊黄素-3-葡萄糖苷的摩尔吸光系数,26 900 L/(mol·cm);

$$A = (A_{500 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH } 1.0} - (A_{500 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH } 4.5};$$

$DF$ ——稀释倍数,10;

$M_w$ ——矢车菊黄素-3-葡萄糖苷的摩尔质量,449.2 g/mol。

1.2.9 总多酚含量测定 采用Folin-Ciocaldeu法<sup>[26]</sup>,没食子酸标准曲线方程为 $y=0.0039x+0.0095$ ( $R^2=0.9985$ )。

1.2.10 总黄酮含量测定 参照翟瑶等<sup>[27]</sup>的方法,芦丁标准曲线方程为 $y=0.0114x+0.004$ ( $R^2=0.9995$ )。

### 1.3 数据处理

各试验至少重复3次,结果以平均值±标准偏差表示。采用SPSS软件进行数据分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA analysis)进行统计显著性分析,并进行Tukey检验, $P<0.05$ 表示差异显著;采用Origin 9.0、Graphpad软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸碱环境下藕粉溶液的颜色变化

经开水冲泡并恢复至室温后,样品1~5的pH分别为8.24,7.70,8.34,8.10,8.15。不同酸碱条件下,样品5的颜色变化特征不明显,与其他4种仅含藕粉的样品不同,样品5的配料表中除藕粉外,还含有木薯淀粉,因此推测其颜色较浅的原因可能是藕粉含量相对较少,显色不明显。其余样品在酸碱条件下的变化趋势一致,说明影响市售藕粉的呈色物质为同一物质。酸性条件下,各样品均从中性时的淡粉色(样品1~3)或黄色(样品4)变浅,且颜色偏向黄绿色。碱性条件下,样品1~4颜色有所加深,尤其是样品3,从中性时的粉红色(樱花色)变为浅红棕色;样品4从酸性时的黄绿色变为黄棕色。以上藕粉样品在酸碱条件下颜色的变化规律与花青素变化规律不同,常见花青素遇酸变粉色或红色,遇碱变蓝色或紫色<sup>[28]</sup>,而藕粉中色素的变化规律刚好相反;此外,藕粉中营养成分含量结果显示,铁元素含量平均为2 mg/100 g(干重),结合藕粉冲泡后在酸碱环境中的颜色变化规律,推测藕粉中呈色物质不是花青素或铁离子。因此,进一步对样品色素进行提取并采用紫外—可见光光谱扫描分析鉴定。

### 2.2 紫外—可见光光谱分析

由图1(a)可知,5种市售藕粉的色素提取液均在280 nm处出现最大吸收峰,与原花青素的吸收光谱一致。由图2(b)可知,样品3藕粉提取浓缩液在酸性、中性以及微碱性环境下,藕粉色素浓缩液的最大吸收波长保持相对稳定,大约在280 nm处展现出较强的吸收能力,而在其他波长范围内并未观察到显著吸收峰。在碱性环境中,藕粉色素浓缩液的光谱特性出现了显著变化:当pH为10.0时,280 nm处吸收峰红移至285 nm;当pH为11.0时,吸收峰位于286,350,435,508 nm处;当pH为12.0时,吸收峰位于290,352,430,500 nm处;当pH为13.0,吸收峰

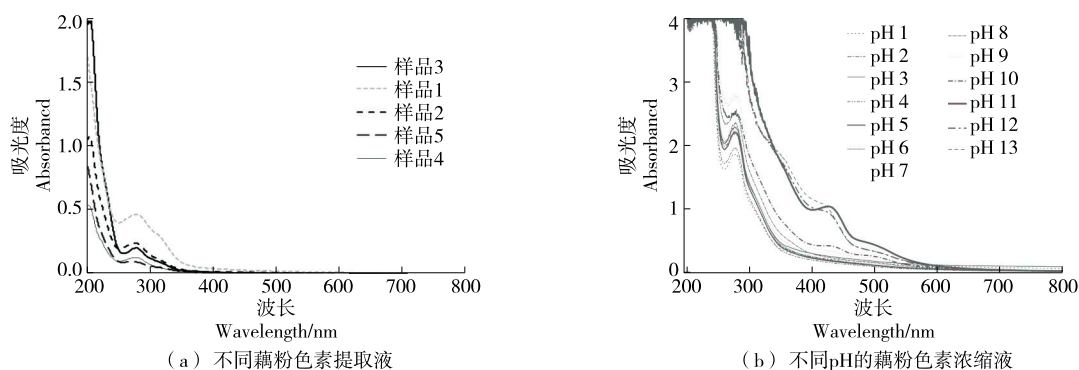


图 1 不同藕粉色素提取液和样品 3 藕粉提取浓缩液的紫外—可见光吸收光谱

Figure 1 UV-Vis spectra of five lotus root powder pigment extracts and concentrated extracts of sample 3

位于 288, 346, 420, 510 nm 处。这与不同 pH 下原花青素的紫外—可见光吸收光谱特征极为相似<sup>[29]</sup>, 从而证实藕粉色素浓缩液中的主要成分为原花青素, 该物质是影响藕粉颜色的关键因素。

### 2.3 pH 和温度对藕粉色素浓缩液颜色变化的影响

由图 2(a) 可知, 随着 pH 的升高, 样品液的颜色由浅黄色变为浅橙粉色最后变为红棕色, 与原花青素随 pH 发生颜色变化的结果相似<sup>[29-30]</sup>, 由此推测影响藕粉呈色的主要物质为原花青素。

由图 2(b) 可知, 70 °C 加热 1 h 后, 藕粉色素浓缩液均较原来更深, 且在 pH 为 11.0~13.0 的强碱环境下尤为明显, 溶液从浅棕色变为深棕色。藕粉色素浓缩液在高温中颜色加深的原因之一为温度升高使原花青素氧化成醌类物质。原花青素中的邻苯二酚结构会被氧化成邻苯醌, 呈现红棕褐色, 符合试验现象; 而在 pH 1.0 和 pH 2.0

的条件下, 藕粉色素浓缩液颜色变化较小, 可能是原花青素含有多羟基, 呈弱酸性, 使其在酸性条件下邻苯二酚的结构更加稳定, 不易被氧化为邻苯醌<sup>[31]</sup>。由图 2(c) 可知, 不同 pH 下的藕粉色素浓缩液的颜色均有不同程度的变浅变黄, 且亮度有所提高, 其中 pH 为 11.0~13.0 的颜色变化程度最大。

综上, 藕粉色素提取浓缩液的颜色变化与其贮藏温度和贮藏时间相关, 高温下贮藏 1 h 颜色会加深, 变成深棕色, 在强碱性环境下尤为明显; 贮藏时间越长, 颜色越浅, 从起初的淡樱花色转化成浅黄色 (pH 为 6.0~10.0 环境下尤为明显), 推测变色规律主要与原花青素的氧化程度相关。此外, 25 °C 贮藏 180 d 后, 藕粉的冲泡颜色比新鲜生产的藕粉颜色要浅, 且偏浅粉色; 4 °C 贮藏 180 d 后, 藕粉的冲泡颜色与新鲜生产的藕粉颜色接近。分析原因主要是原花青素在常温和高温环境下易发生降解, 颜色变



图 2 高温、pH 和贮藏时间对藕粉浓缩液颜色变化的影响

Figure 2 Effects of high temperature, pH, and storage time on color changes of lotus root powder concentrate

浅。因此,25℃下,pH为5.0~9.0时,藕粉提取液的颜色保持在橙粉色区间,如果通过温度控制和pH调控,可使藕粉的橙粉色或粉红色保持相对稳定,有助于调控藕粉的冲泡颜色并对其进行品质评价。

#### 2.4 藕粉色素浓缩液与原花青素标准品在酸碱溶液中的颜色变化

藕粉色素浓缩液与市售的原花青素分析标准品所配成的溶液,在酸性、中性和碱性条件下的颜色均为浅粉黄色、橙粉色和红棕色,进一步证实藕粉中的呈色物质为原花青素。

#### 2.5 UPLC-Q-TOF-MS 鉴定藕粉中原花青素种类

由图3(a)可知,藕粉色素浓缩液冻干粉的主要离子峰分别为 $m/z$  289,305,577,729。提取浓缩液中原花青素得率为37.6%。当 $m/z$ 为289时,保留时间3.11 min的为儿茶素,保留时间3.94 min的为表儿茶素<sup>[32]</sup>,且儿茶素含量显著高于表儿茶素;当 $m/z$ 为305时,保留时间为1.90,2.20 min,说明没食子儿茶素和表没食子儿茶素均存在<sup>[33]</sup>;当 $m/z$ 为577时,其组分为原花青素B1/B2/B3/B4,对应保留时间为2.99 min,可以在质谱图中找到原花青素B1/B2/B3/B4的特征碎片,即 $m/z$ 为407和425;当 $m/z$ 为729时,保留时间为11.65,12.77 min,说明其对应的组分有两种物质,根据文献<sup>[34]</sup>可知, $m/z$  729为二聚单酯形式的原花青素,两种组分为同分异构体。

由图3(b)和表1可知,藕粉色素浓缩液冻干粉中的原

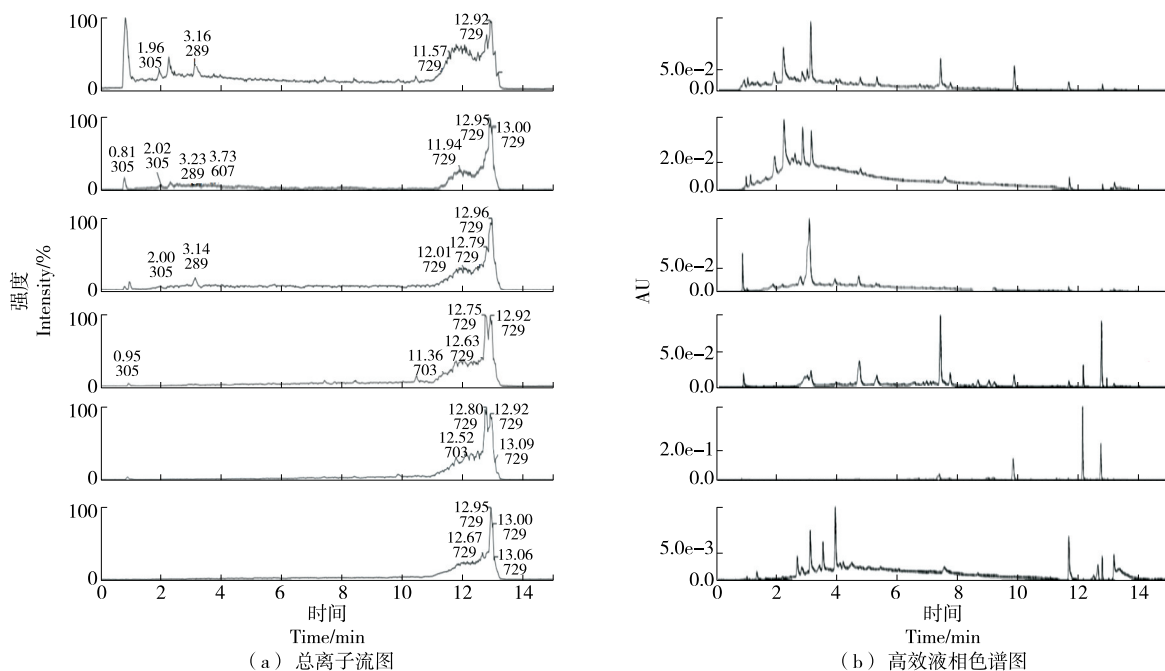
表1 藕粉色素浓缩液冻干粉中的原花青素

Table 1 Proanthocyanidins in the freeze-dried powder of lotus root powder pigment concentrate

保留时间/min	$\lambda_{\max}/\text{nm}$	$[\text{M}-\text{H}]^-$	化合物
1.90	280	305	(+)-没食子儿茶素/(-)-表没食子儿茶素
2.20	280	305	(+)-没食子儿茶素/(-)-表没食子儿茶素
2.99	280	577	原花青素B1/B2/B3/B4
3.11	280	289	(+)-儿茶素
3.94	280	289	(-)-表儿茶素
11.65	280	729	二聚单酯原花青素
12.77	280	729	二聚单酯原花青素(同分异构)

花青素中儿茶素和没食子儿茶素/表没食子儿茶素含量最高,其次是二聚单酯原花青素和表儿茶素。

根据质谱结果分析,F20原花青素中含量较高的为原花青素B1/B2/B3/B4-OH、原花青素B1/B2/B3/B4和(+)-儿茶素/(-)-表儿茶素;F40原花青素主要为(-)-儿茶素,其次为原花青素B1/B2/B3/B4,再次为表儿茶素;F60原花青素中含量最高的为二聚单酯原花青素;F80原花青素多为二聚单酯原花青素。由此可知,乙醇体积分数越高,洗脱得到的原花青素相对分子质量越大,由80%乙醇



由上至下依次为1 mg/mL藕粉色素浓缩液冻干粉、F20、F40、F60、F80和原花青素标准品

图3 样品的总离子流图和高效液相色谱图

Figure 3 Total chromatogram and HPLC chromatogram of samples

洗脱得到的原花青素多为相对分子质量较大的二聚体,说明藕粉中的呈色物质原花青素的组成相对简单,多为相对分子质量较低(MW<1 000)的低聚原花青素及单体。由表 2 可知,原花青素标准品中绝大多数为(+)-儿茶素、(-)-表儿茶素和二聚单酯原花青素,与标准品的标注成分一致。

表 2 原花青素标准品中的原花青素种类<sup>†</sup>

Table 2 Proanthocyanidins in proanthocyanidin standards

保留时间/min	$\lambda_{\max}$ /nm	[M-H] <sup>-</sup>	化合物
3.11	280	289	(+)-儿茶素
3.53	280	577	原花青素 B1/B2/B3/B4
3.94	280	289	(-)-表儿茶素
4.20	280	865	原花青素 B1/B2/B3/B4-EC/C
11.66	280	729	二聚单酯原花青素
12.62	280	729	二聚单酯原花青素(同分异构)
12.77	280	729	二聚单酯原花青素(同分异构)
13.16	280	729	二聚单酯原花青素(同分异构)

<sup>†</sup> EC 为(-)-表儿茶素;C 为(+)-儿茶素。

2.6 傅里叶红外光谱测定藕粉中原花青素结构

由图 4 可知,3 362 cm<sup>-1</sup>处为原花青素羟基的伸缩振动;2 923 cm<sup>-1</sup>处为苯环的 C—H 伸缩振动;1 710 cm<sup>-1</sup>处可能是石油酸或酯的 C=O 伸缩振动,说明样品中可能含有没食子酸;1 608,1 514,1 448 cm<sup>-1</sup>处为苯环 C=C 键的典型伸缩振动,表明样品中具有芳香结构;1 243 cm<sup>-1</sup>处吸收峰与酚羟基的伸缩振动及面内弯曲振动有关<sup>[35]</sup>;1 142 cm<sup>-1</sup>处可能与原花青素吡喃环中的 C—H 伸缩振动有关;1 041 cm<sup>-1</sup>处为原花青素分子中吡喃环的 C—C 伸缩振动;818 cm<sup>-1</sup>处可能是由苯环上相邻的 3 个氢原子所引起。由此推测,藕粉色素冻干粉中的物质为原花青素。通过对比藕粉色素冻干粉与 5 种不同类别(A、B、C、D、E)的聚原花青素的红外光谱图谱<sup>[36]</sup>可知,藕粉色素冻干粉与 A 类聚原花青素的红外光谱具有较高的相似性,两者在 1 520~1 540 cm<sup>-1</sup>处均显示出 1 个峰值(1 514 cm<sup>-1</sup>),说明藕粉中的原花青素聚合体中儿茶素含量高于表儿茶素<sup>[37]</sup>。藕粉色素在 780~770 cm<sup>-1</sup>处显示出明显的特征吸收峰,说明藕粉原花青素的结构单元包含儿茶素;在 730 cm<sup>-1</sup>处呈现出 1 个明显的强吸收带,说明其结构单元中含有表儿茶素,上述 FT-IR 鉴定结果与质谱检测结果一致。

2.7 藕粉中原花青素、花青素、总多酚和总黄酮含量

通过对不同样品的色素提取浓缩液进行检测,样品 1~5 的原花青素总量分别为(0.140±0.002), (0.091±0.003), (0.147±0.003), (0.150±0.008), (0.080±

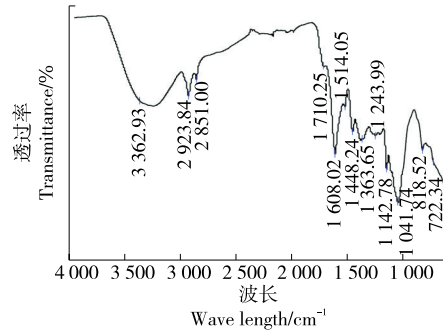


图 4 藕粉色素冻干粉红外光谱图

Figure 4 FTIR spectrum of freeze-dried powder of lotus root powder pigment

0.002) mg/g 藕粉。其中,样品 3 的花青素含量为(0.001 1±0.000 3) mg/g 藕粉,总多酚含量为(0.262±0.003) mg GAE/g 藕粉,总黄酮含量为(0.348±0.008) mg/g 藕粉。

3 结论

以 5 种市售藕粉为研究对象,通过观察酸碱环境下藕粉溶液的颜色变化来推测呈色物质。结果表明,藕粉的呈色物质为原花青素,5 种市售藕粉的原花青素含量为 0.080~0.150 mg/g,且原花青素含量越高,藕粉溶液的粉红色越明显;藕粉冲泡的颜色变化与其贮藏时间和贮藏温度相关,随着贮藏时间的延长,藕粉颜色会从粉红色转化成浅黄色,贮藏温度越高,颜色越深,颜色变化主要与原花青素的氧化程度相关。藕粉中的原花青素主要包括儿茶素、表儿茶素等多种原花青素,以低聚原花青素为主,相对分子质量普遍<896。以样品 3 为例,藕粉中花青素、总多酚、总黄酮含量分别为(0.001 1±0.000 3) mg/g、(0.262±0.003) mg GAE/g 和(0.348±0.008) mg/g。在后续研究中,可进一步研究藕粉在不同保存条件以及藕粉热加工产品开发过程中的颜色变化与其原花青素含量和组成的关系。

参考文献

[1] 杨郑州, 麦馨允, 谢晓娜, 等. 一种莲藕酸奶的制备方法: CN201710570356.2[P]. 2020-05-19.  
 YANG Z Z, MAI X Y, XIE X N, et al. A preparation method for lotus root yogurt: CN201710570356.2[P]. 2020-05-19.  
 [2] 牛丽影, 顾艳阳, 胡丽丽, 等. 莲藕汁饮品研发现状与趋势[J]. 农产品加工, 2021(7): 77-79.  
 NIU L Y, GU Y Y, HU L L, et al. Research development and prospect of lotus root drinks[J]. Farm Products Processing, 2021 (7): 77-79.  
 [3] 宋文霞, 李桂菊, 王鑫淼, 等. 同步糖化发酵工艺酿造白莲藕酒的研究[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 69-75.

- SONG W X, LI G J, WANG X M, et al. Study on white lotus root wine brewing process using simultaneous saccharification and fermentation[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 69-75.
- [4] 闵燕萍, 陈宗道, 钟耕, 等. 藕淀粉的加工性能研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 259-263.
- MIN Y P, CHEN Z D, ZHONG G, et al. Processing properties of lotus starch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 259-263.
- [5] 陈众. 水煮藕片蓝变机制研究及风味藕片产品研发[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 1-13.
- CHEN Z. Study on the mechanism on blueing of boiled lotus rhizome discs and the development of flavored lotus rhizome discs[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 1-13.
- [6] 范文新, 孙艳波, 陈众, 等. 鄂莲5号莲藕中铁元素含量周年变化及赋存形态[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 49-54, 77.
- FAN W X, SUN Y B, CHEN Z, et al. Annual variation and occurrence form of iron content in Elian No. 5 lotus root[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 49-54, 77.
- [7] 顾晓敏, 杨海龙, 韩延超, 等. 不同品种莲藕淀粉与全粉颗粒形态及品质特性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 95-101.
- GU X M, YANG H L, HAN Y C, et al. Analysis on the morphology and quality characteristics of different varieties of lotus root starch and whole powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 95-101.
- [8] CHEN X Q, CHEN Z, DUAN R B, et al. Formation mechanism of blue pigment in boiled lotus rhizome discs: insight into the chelation of polyphenols and iron[J]. Food Research International, 2024, 192: 114818.
- [9] CHEN X Q, LIU Z, HE Y, et al. Mechanism of red pigment formation in lotus rhizome soup during cooking: the role of polyphenols, iron and organic acids[J]. Food Research International, 2024, 197: 115266.
- [10] ZHAO R F, PENG K D, YI Y, et al. Heating alters the nutritional and antioxidant characteristics of lotus root[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 210: 116848.
- [11] 张小敏, 丁瑞, 吴艳刚, 等. 蔡甸特色藕带的营养品质及风味特性综合评价[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 139-147.
- ZHANG X M, DING R, WU Y G, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality and flavor properties of caidian characteristic lotus sprout[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 139-147.
- [12] 顾晓敏. 不同品种莲藕品质分析及低温速溶藕粉工艺研究[D]. 温州: 温州大学, 2021: 7.
- GU X M. Research on quality characteristics of different varieties of lotus root and low-temperature instant lotus root powder technology[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021: 7.
- [13] 韩燕. 氢化物发生原子荧光法测定莲藕及加工藕粉中的砷[J]. 现代食品, 2020, 26(2): 166-168.
- HAN Y. Determination of arsenic in lotus root and processed lotus root powder by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. Modern Food, 2020, 26(2): 166-168.
- [14] 马佳庆. 中国藕粉质量评价及减菌加工新工艺研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 1-12.
- MA J Q. Quality evaluation and research on new processing techniques for microbial reduction in Chinese lotus rhizome starch[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 1-12.
- [15] YU Y Y, SU D B, XU H H, et al. Unveiling lotus root processing under vacuum microwave: starch - malic acid interactions based on moisture, structure, and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142862.
- [16] 李旭好, 韩蒙, 李芳, 等. 预处理方式对干制莲藕品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 194-199.
- LI X H, HAN M, LI F, et al. Effects of different pretreatment methods on the quality characteristics of dried lotus root[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 194-199.
- [17] 李旭好, 钟靖涵, 李芳, 等. 超声强化方式对热泵干燥莲藕品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 27-33, 89.
- LI X H, ZHONG J H, LI F, et al. Effects of different ultrasonic enhancement methods on the quality characteristics of dried lotus root in heat pumps[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 27-33, 89.
- [18] 袁明霞, 宋微, 刘换换, 等. 重瓣铁线莲花色与花青素的关系[J]. 分子植物育种, 2023, 21(3): 941-949.
- YUAN M X, SONG W, LIU H H, et al. The relationship between the colors and anthocyanins of clematis hybrid with double petals[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(3): 941-949.
- [19] LIU J, WANG Y X, ZHANG M H, et al. Color fading in lotus (*Nelumbo nucifera*) petals is manipulated both by anthocyanin biosynthesis reduction and active degradation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 179: 100-107.
- [20] 祝波, 刘珊珊. 超声波-乙醇法提取原花青素的工艺研究[J]. 吉林化工学院学报, 2019, 36(1): 1-4.
- ZHU B, LIU S S. Study on of the extraction technology of proanthocyanidin by ultrasonic assisted methanol[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2019, 36(1): 1-4.
- [21] 孙芸, 徐宝才, 谷文英, 等. AB-8树脂对葡萄籽原花青素按聚合度分离特性的研究[J]. 食品科技, 2007, 32(6): 60-64.
- SUN Y, XU B C, GU W Y, et al. Study on the fractionation of grape seed procyanidins by AB-8 adsorbent resin[J]. Food Science and Technology, 2007, 32(6): 60-64.
- [22] 李三省, 许丹丹, 张富粟, 等. AB-8大孔树脂纯化黑果枸杞原花青素及其稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(3): 106-114.
- LI S X, XU D D, ZHANG F S, et al. Purification of proanthocyanidins from *Lycium ruthenicum* Murr. by AB-8 macroporous resin and its stability[J]. China Food Additives, 2018(3): 106-114.

- [23] 李绮丽, 彭芳刚, 刘德明, 等. 红莲外皮原花青素的纯化与分析[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 106-110.  
LI Q L, PENG F G, LIU D M, et al. Purification and analysis of proanthocyanidins from red peel of lotus seeds[J]. Food Science, 2014, 35(3): 106-110.
- [24] 黄雪松, 黄文焯. 对-二甲氨基肉桂醛法测定山竹原花青素[J]. 现代食品科技, 2013, 29(7): 1 687-1 690.  
HUANG X S, HUANG W Y. Determination of proanthocyanidins in mangosteen by 4- (dimethylamino) cinnamaldehyde assay[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(7): 1 687-1 690.
- [25] 李建伟. pH 示差法测定山楂中花青素的含量[J]. 长治医学院学报, 2015, 29(3): 177-179.  
LI J W. Determination of anthocyanin conten in crataegi fructus by pH-differential method[J]. Journal of Changzhi Medical College, 2015, 29(3): 177-179.
- [26] YI Y, SUN J, XIE J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of lotus root varieties[J]. Molecules, 2016, 21(7): 863.
- [27] 翟瑶, 钟文, 林鹏程. UV 法和 HPLC 法测定藏药多腺悬钩子中总黄酮及芦丁的含量[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2 144-2 146.  
ZHAI Y, ZHONG W, LIN P C. Determination of total flavonoids and rutin contents of rubus phoenicolasius by UV and HPLC[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(9): 2 144-2 146.
- [28] KHOO H E, AZLAN A, TANG S T, et al. Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits[J]. Food & Nutrition Research, 2017, 61(1): 1361779.
- [29] 郭宝慧, 石琦, 翟月, 等. 原花青素光学性质及抗氧化活性的研究与应用[C]// 2018 第二届全国波谱学学术年会会议论文摘要集. 温州: 全国波谱学学术年会, 2018: 284-285.  
GUO B H, SHI Q, ZHAI Y, et al. Study and application of optical properties and antioxidant activity of proanthocyanidins [C]// Proceedings of the 20th National Symposium on Spectroscopy: Abstracts. Wenzhou: Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology (APM), 2018: 284-285.
- [30] GUO B H, LV K L, HU Y Q, et al. Study on optical properties and biological activity of proanthocyanidins at different pH and alkalinit[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 706(1): 012040.
- [31] 陈晓云, 张峻, 吉伟之, 等. 高温操作及贮存过程中葡萄多酚的稳定性[J]. 天津农业科学, 2003, 9(2): 18-21.  
CHEN X Y, ZHANG J, JI W Z, et al. Storage and thermal stability of polyphenols from grape seeds[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2003, 9(2): 18-21.
- [32] 彭芳刚, 吴卫国, 李绮丽, 等. 红莲外皮原花青素各级分的分析鉴定[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 212-217.  
PENG F G, WU W G, LI Q L, et al. Analysis of proanthocyanidin fractions from red skin of lotus seed[J]. Food Science, 2014, 35(12): 212-217.
- [33] 谢汝朋. 莲子采后保鲜过程中酚酸的变化及莲房原花青素的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013: 45.  
XIE R P. Change of phenolic acids in post-harvested lotus seeds during fresh-keeping and research of proanthocyanidins from lotus seedpod[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013: 45.
- [34] 汪玉玲. 青桑葚中低聚原花青素的分离纯化及其抗氧化和降血糖活性研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2023: 29-33.  
WANG Y L. Isolation and purification of oligomeric proanthocyanidins from green mulberry and their study of antioxidant and hypoglucemic activities[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023: 29-33.
- [35] 李春阳, 许时婴, 王璋. 葡萄籽原花青素结构单元的红外光谱分析[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(4): 47-51.  
LI C Y, XU S Y, WANG Z. The analysis of the infrared spectra of grape seed proanthocyanidins[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2005, 24(4): 47-51.
- [36] FOO L Y. Proanthocyanidins: gross chemical structures by infrared spectra[J]. Phytochemistry, 1981, 20(6): 1 397-1 402.
- [37] 张惠. 莲房高聚体原花青素催化降解工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018: 13-22.  
ZHANG H. Study on the catalytic degradation process of high polymer procyanidins form lotus seed pot[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018: 13-22.