

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240925004

8 种彩色马铃薯中花青素含量测定及其在贮藏过程中的含量变化研究

谷如祥*, 冯淑贞, 刘聪慧, 阿娜日, 俎爱忠

(乌兰察布市检验检测中心, 乌兰察布 012000)

摘 要: **目的** 测定 8 种彩色马铃薯块茎中花青素含量及其在贮藏过程中含量变化。**方法** 应用高效液相色谱法分别对不同贮藏期间 8 种彩色马铃薯薯皮和薯肉中的 6 种主要花青素进行测定。**结果** 8 种彩色马铃薯薯皮、薯肉中花青素的种类及含量差距明显, 均能检测到 4 种以上的花青素, 飞燕草色素、矮牵牛色素、芍药素广泛存在于 8 种彩色马铃薯的块茎中, 薯肉中均未检测到矢车菊色素。6 种紫色马铃薯块茎中主要的花青素为矮牵牛色素, 2 种红色马铃薯块茎中主要花青素是天竺葵色素, 6 种花青素含量占整个马铃薯块茎花青素含量的 82.5% 以上; 在贮藏过程中 CS3 薯皮及块茎中天竺葵色素在 15 d 时含量达到最高, CS4 薯皮中矮牵牛色素在 29 d 时含量达到最高, CS4 和 CS7 的薯皮及块茎、CS6 薯肉及块茎、CS8 薯皮及薯肉中的飞燕草色素在 29 d 时含量达到最高, CS5 薯皮及块茎中的芍药素在 29 d 含量达到最高, 其余彩色马铃薯薯皮及薯肉中各花青素的含量在 22 d 时含量达到最高。**结论** 8 种彩色马铃薯(尤其是薯皮)均含有丰富的花青素, 贮藏时间不同, 花青素种类无明显变化, 块茎和表皮中的花青素含量变化明显, 薯肉中的花青素含量无明显变化, 为提升彩色马铃薯的附加价值以及花青素资源的开发提供思路 and 基础数据。

关键词: 彩色马铃薯; 高效液相色谱法; 花青素

Determination of anthocyanin content in 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. varieties and its changes during storage

GU Ru-Xiang*, FENG Shu-Zhen, LIU Cong-Hui, A Na-Ri, ZU Ai-Zhong

(Ulanqab Inspection and Testing Center, Ulanqab 012000, China)

ABSTRACT: Objective To determine the content of anthocyanins and their changes during storage in the tuber of 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. varieties. **Methods** The content of 6 kinds of major anthocyanins in the skin and flesh of 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. from different storage periods were determined by high performance liquid chromatography. **Results** There were significant differences in the composition and content of anthocyanins in the tuber of 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L., and more than 4 kinds of anthocyanins could be detected in each sample. Delphinidin, petunidin and peonidin were widely found in the tuber of coloured *Solanum tuberosum* L., no cyanidin was found in flesh. Petunidin was the dominant anthocyanidin in purple-coloured *Solanum tuberosum* L., while pelargonidin was the main anthocyanidin in red-coloured *Solanum tuberosum* L.. The 6 kinds of anthocyanidins in the skin of coloured *Solanum tuberosum* L. account for over 82.5% of total anthocyanins in whole tuber. During the storage, the content of pelargonidin in the skin and tuber of CS3 reached the highest at 15 d, the

*通信作者: 谷如祥, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 304067090@qq.com

*Corresponding author: GU Ru-Xiang, Engineer, Ulanqab Inspection and Testing Center, Building 2, Phase 3, Central Business Square, Chahar Street, Jining District, Ulanqab 012000, China. E-mail: 304067090@qq.com

content of petunidin in the skin and tuber of CS4 reached the highest at 29 d, the content of delphinidin in the skin and tuber of CS4 and CS7, the flesh and tuber of CS6 and the skin and flesh of CS8 reached the highest at 29 d, the content of peonidin in the skin and tuber of CS5 reached the highest at 29 d. The anthocyanidins of the skin and flesh in the rest of coloured *Solanum tuberosum* L. reached the highest at 22 d. **Conclusion** All 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. (especially in skins) contain abundant anthocyanins. There is no significant change in anthocyanin composition but obvious variation in its content in skin and tuber, whereas there is little difference in anthocyanin content in flesh. This study provides ideas and basic data to enhance added value of colored potatoes as well as develop resources of anthocyanins.

KEY WORDS: colored *Solanum tuberosum* L.; high performance liquid chromatography; anthocyanidin

0 引 言

马铃薯作为全球第 4 大粮食作物、第 3 大主食，具有生产成本低、生育期短、营养丰富等特点。到 2023 年底，全国规模化的马铃薯加工企业约 140 家，精加工率约 12%^[1]，其食用、饲用、种用及消耗量仍为马铃薯的主要加工用途，产品价值低，如何实现马铃薯的加工转化提升是当下马铃薯产业发展亟待解决的问题^[2]。

花青素是天然水溶性色素，属于花色苷的苷元部分，是黄酮类化合物，具有抗肿瘤^[3]、保护视力^[4]、免疫调节^[5-6]、抗氧化^[7-11]、保护神经^[12]、缓解肠道损伤^[13-14]等功效，因其种类及含量不同，使得植物呈现出不同的颜色，常见于植株色彩斑斓的叶与花^[15-17]或者有色果实^[18]如蓝莓、紫薯、葡萄等。目前对花青素的检测多集中于酸性醇提，以高效液相色谱法^[19-20]、紫外分光光度法、pH 示差法^[20]、高效液相色谱-质谱联用技术^[21-22]进行成分及含量测定。随着杂交技术的出现，马铃薯的产业发展出现了突破口，彩色马铃薯除本身具有的营养价值外，花青素将成为其主要组成部分^[23-24]，据报道彩色马铃薯的薯肉和薯皮中花青素的含量较高，且一般表皮的花青素含量高于薯肉^[25]，是天然色素和抗氧化剂的重要来源。但目前对彩色马铃薯中花青素在贮藏过程中的含量变化鲜有研究^[26]，本研究通过对 8 种彩色马铃薯及贮藏过程中 6 种主要花青素的含量和种类变化进行研究，为提升马铃薯的经济价值及副产物的利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

8 种彩色马铃薯(由内蒙古民丰种业有限公司自培自育，未申请品种认定，暂命名: CS1、CS2、CS3、CS4、CS5、CS6、CS7 和 CS8)。6 种花青素对照物质(见表 1); 甲醇(色谱纯，上海安谱实验科技股份有限公司); 盐酸(优级纯，成都市科隆化学品有限公司); 无水乙醇[色谱纯，福晨(天津)化学试剂有限公司]; 甲酸(优级纯，天津市光复精细化工研究所)。

1.2 仪器与设备

LC-2030 高效液相色谱仪(含紫外检测器，日本岛津公司); Tnature C₁₈ 色谱柱[4.6 mm×250 mm×5 μm，华谱科仪(北京)科技有限公司]; HHS-21-6 恒温水浴(上海博讯实业有限公司医疗设备厂); PB-10 pH 计[Sartorius 科学仪器股份有限公司(德国)]; WDL-CG207G 破壁料理机[惠而浦(中国)投资有限公司]; KQ-500VDE 型双频数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); BSA200S-WEI 电子天平(精度 1 mg)、SQP 电子天平(精度 0.01 mg)[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 标准溶液的制备

将上述 6 种花青素标准物质分别用 10%盐酸甲醇溶解，并定容，配制成标准储备液。取适量花青素标准储备液并用 10%盐酸甲醇定容到 5.0 μg/mL，制得花青素混合标准

表 1 标准物质信息表
Table 1 Information table of standard substances

名称	CAS	批号	规格	厂家
氯化苜蓿素	134-01-0	2350707	1 mg, 94.3%	上海安谱瑞世标准技术服务有限公司
氯化锦葵色素	648-84-5	2360149	1 mg, 98.0%	
氯化矢车菊素	528-58-5	2256321	10 mg, 97.1%	
氯化飞燕草素	528-53-0	2252819	1 mg, 91.8%	
氯化天竺葵素	134-04-3	2257301	10 mg, 92.9%	
矮牵牛素	1429-30-7	2359512	5 mg, 95.6%	

溶液。准确量取适量的花青素混合标准溶液, 逐级稀释配制成质量浓度分别为 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0 $\mu\text{g/mL}$ 的系列标准工作液, 高效液相色谱仪上机测定。

1.3.2 试样的制备

将 8 种马铃薯用削皮刀作削皮处理, 薯肉与薯皮高速粉碎后, 分别准确称量 1 g 的薯肉和薯皮于 50 mL 的具塞比色管中, 加入提取液(无水乙醇:水:盐酸=2:1:1, V:V:V)并定容至刻度, 充分摇匀后超声提取 30 min, 取出后于沸水浴中水解 1 h, 待冷却后, 用上述提取液定容, 静置, 取上清液, 过 0.22 μm 尼龙针式滤膜后上机测定。

1.3.3 高效液相色谱仪的测定

将上述标准系列工作液及待测样品分别吸取 10 μL 进行测定, 其中紫外检测器的测定波长 530 nm, 柱温 35 $^{\circ}\text{C}$, 流动相为 1%甲酸乙腈及 1%甲酸水溶液的梯度洗脱, 洗脱程序见表 2, 流速 0.8 mL/min。

表 2 梯度洗脱程序 Table 2 Gradient elution procedure		
时间/min	1%甲酸乙腈/%	1%甲酸水/%
0.01	8	92
2.00	12	88
5.00	15	85
10.00	18	82
12.00	25	75
15.00	30	70
18.00	45	55
20.00	80	20
22.00	8	92
25.00	8	92

1.3.4 贮藏样品的测定

将相同品种的彩色马铃薯放置于避光干燥的室温条件下贮藏, 分别于贮藏当天、15、22、29 d 后按照 1.3.2 和 1.3.3 中步骤处理后上机测定。

1.4 数据处理

用 LC-2030 高效液相色谱仪自带 LabSolutions 色谱工作站系统自动采集数据, 用自带的分析软件根据保留时间定性, 制作的标准曲线测定含量结合面积归一法定量分析。数据结果分析使用 WPS Office 2024 软件进行计算、Origin 2018 64 Bit 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 仪器条件的优化

顿倩等^[21]应用液相色谱-质谱联用技术分析黑豆皮中的结合性花青素; 杜月娇等^[27]应用响应面法优化超高压液相色谱法对山葡萄中的花青素测定条件进行分析检测; 陈子凡等^[20]总结了蓝莓中花青素的各种提取方法, 认为高效液相色谱法有助于分析蓝莓产品中的花青素在抗氧化效果

方面所起的作用和原理。本研究的色谱柱沿用 NY/T 2640—2014《植物源性食品中花青素的测定 高效液相色谱法》中的 C_{18} 色谱柱(4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$ 5 μm), 但鉴于原方法的分析时间长, 本研究对梯度洗脱程序进行了优化, 6 种花青素分离色谱图(质量浓度 5.0 $\mu\text{g/mL}$)如图 1 所示, 各目标物分离效果较好, 各目标物之间分离度均大于 1.5, 无杂峰干扰, 分析时间缩短至 25 min, 从而使得甲酸及有机溶剂的使用也随之减少。

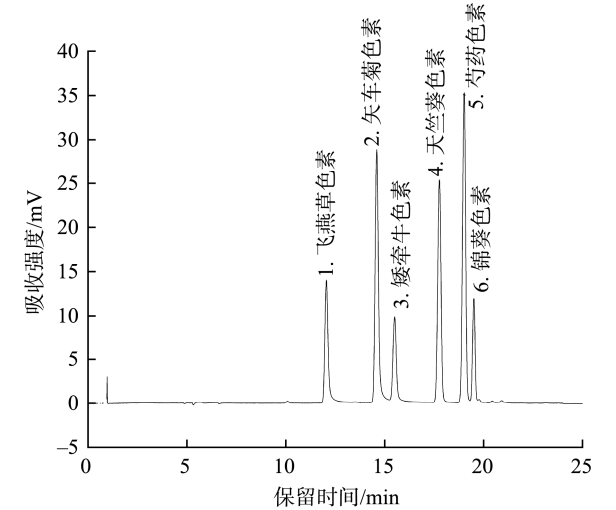


图 1 6 种花青素高效液相色谱图谱
Fig.1 High performance liquid chromatography of 6 kinds of anthocyanins

2.2 线性范围、线性方程及相关系数

在优化梯度洗脱后对 6 种花青素的系列标准溶液上机测定, 以目标物的质量浓度为横坐标(X, $\mu\text{g/mL}$), 峰面积为纵坐标(Y), 绘制标准曲线图, 结果见表 3, 6 种花青素在其相应浓度范围内均呈现良好的线性关系, 相关系数均达到 0.9990 以上。

2.3 不同品种间初始状态的花青素组分及含量分析

各品种表皮和薯肉中花青素的初始含量及比例倍数如表 4 所示, CS5 中薯皮及薯肉均未检测到矢车菊色素和天竺葵色素, 除 CS1、CS4、CS5 外其余 5 种马铃薯薯皮中均含有 6 种花青素, 即飞燕草色素、矢车菊色素、矮牵牛色素、天竺葵色素、芍药素和锦葵色素。CS1 和 CS4 马铃薯薯皮中未检测到锦葵色素, 其薯肉部分检测到其余 6 种彩色马铃薯的薯肉部分未检测到的天竺葵色素。8 种彩色马铃薯的薯肉部分均未检测到矢车菊色素, 可能是杂交父母本之间缺少该花青素的关键调控基因, 从刘毅强^[28]、董海涛^[29]的研究中发现极可能原因是矢车菊色素被转甲基酶转化生成了芍药素。

CS1、CS4、CS5 3 种彩色马铃薯中表皮花青素种类与薯肉的花青素种类一样多, 其余 5 种彩色马铃薯的薯皮花青素种类多于薯肉的花青素种类。从花青素初始含量来看, 不同品种之间存在差异, CS1、CS4 中含量最高的花青素种类是

表 3 6 种花青素的线性范围、线性方程及相关系数
Table 3 Linear rangers, linear equaions and correlation coefficients of 6 kinds of anthocyanins

目标物	线性范围/(μg/mL)	线性方程	相关系数
飞燕草色素	0.0918~4.590	Y=54613.6X-5604.7	0.9995
矢车菊色素	0.0971~4.855	Y=116410.0X-7999.9	0.9997
矮牵牛色素	0.0956~4.780	Y=41151.1X-2623.4	0.9998
天竺葵色素	0.0929~4.645	Y=98238.4X-4266.6	0.9998
芍药素	0.0943~4.715	Y=131609.0X-5819.1	0.9998
锦葵色素	0.0980~4.900	Y=36716.8X-2271.0	0.9997

表 4 8 种彩色马铃薯中花青素的含量
Table 4 Anthocyanidins composition of 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L.

品种	飞燕草色素			矢车菊色素			矮牵牛色素			天竺葵色素			芍药素			锦葵色素			薯皮花青素总量	块茎花青素总量	薯皮占比
	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	薯皮 (mg/kg)	薯肉 (mg/kg)	倍 数	/(mg/kg)	/(mg/kg)	/%
CS1	1.0	2.2	0.4	1.1	0.0	-	2.1	2.0	1.1	109.9	11.3	9.8	5.1	1.2	4.2	0.0	0.9	-	119.2	136.8	87.2
CS2	2.3	2.2	1.1	1.0	0.0	-	84.2	4.6	18.3	0.4	0.0	-	8.0	1.7	4.8	6.6	1.3	5.2	102.6	112.3	91.4
CS3	5.0	4.3	1.2	1.1	0.0	-	356.3	41.6	8.6	0.6	0.0	-	11.5	4.9	2.3	30.2	5.1	6.0	404.7	460.6	87.9
CS4	1.3	2.1	0.7	1.7	0.0	-	2.5	2.2	1.2	103.6	9.1	11.3	17.0	1.2	14.3	0.0	0.9	-	126.2	141.6	89.1
CS5	5.0	2.8	1.8	0.0	0.0	-	223.9	14.0	16.0	0.0	0.0	-	0.5	0.8	0.6	9.9	2.1	4.8	239.3	259.0	92.4
CS6	3.3	3.6	0.9	2.0	0.0	-	203.3	36.2	5.6	0.8	0.0	-	13.7	6.8	2.0	9.7	2.9	3.3	232.9	282.5	82.5
CS7	9.9	4.9	2.0	4.4	0.0	-	830.0	46.5	17.8	9.3	0.0	-	32.3	5.7	5.6	52.4	5.0	10.5	938.3	1000.4	93.8
CS8	5.0	3.6	1.4	2.8	0.0	-	359.8	19.4	18.6	3.1	0.0	-	21.9	3.7	6.0	24.3	1.8	13.3	416.9	445.4	93.6

注：-代表薯皮或薯肉中该花青素未检出；块茎包括薯肉和薯皮。

天竺葵色素，尤其薯皮的天竺葵色素含量均比薯肉的高约 10.0 倍，且这两个彩色马铃薯薯皮中所含的天竺葵色素含量比其他花青素种类的含量高；其余 6 种彩色马铃薯块茎中花青素含量最高的是矮牵牛色素，CS7 薯皮中的矮牵牛色素均比其他 5 种花青素的含量高，结合图 2 的色泽，矮牵牛色素是紫色马铃薯(CS2、CS3、CS5、CS6、CS7 和 CS8)块茎中的主要花青素，即是杂交父母本之间含有大量的类黄酮 3'5'-羟化酶基因，缺少转甲基酶基因，使得彩色马铃薯的表达显色为紫色；红色马铃薯(CS1、CS4)块茎中天竺葵色素含量最高，原因可能是在合成花色素时，均含有大量的二氢黄酮醇还原

酶^[29]，其色泽表现为砖红色，属于天竺葵色素的显色反映。

各彩色马铃薯块茎中薯皮与薯肉的花青素含量差距明显，除未检测到的花青素种类外，其中 CS2、CS5、CS7、CS8 薯皮中的矮牵牛色素均比薯肉的含量高达 16.0 倍以上，CS1、CS4 薯皮中的天竺葵色素均比薯肉的含量高 9.8 倍、11.3 倍，CS4 的薯皮与薯肉中芍药素的含量比例达到 14.3 倍，CS7、CS8 薯皮中的锦葵色素均比薯肉的含量高达 10.5 倍、13.3 倍，其余薯皮与薯肉中花青素种类的含量均未达到 10.0 倍；除未检测到的花青素含量，CS2、CS3、CS7、CS8 薯皮中各花青素的含量比例均比薯肉中各花青素的含量高；CS1、CS4、CS6 薯皮中含的飞燕草色素含量低于薯肉，CS5 薯皮含有的芍药素含量低于薯肉。

薯皮中 6 种花青素总量所占比例均达到 82.5%以上，其中有一半的彩色马铃薯薯皮花青素含量高达 90.0%以上，CS7、CS8 表皮总花青素含量占比高达 93.6%以上，8 个品种马铃薯块茎表皮的花青素总量均高于薯肉，这与殷丽琴等^[25]的研究一致，从 MENDEL^[30]分析中发现可能由于花青素的积累过程是由表皮向内渗透，因而表皮的花青素要比薯肉中多，这也为薯皮这一加工过程中的副产物的再利用提供了支撑。且薯皮和薯肉中花青素与花色呈色密切相关，这与李梦^[18]的研究结果一致。

2.4 不同品种间贮藏过程中花青素的变化

对 8 种彩色马铃薯在不采取任何保护措施的条件于室温下贮藏 29 d，并对贮藏过程中花青素的组分和含量变化进行研究，之后马铃薯表皮皱缩，不再进行测定。8 种彩色马铃薯各花青素贮藏过程中含量变化如图 3 所示。

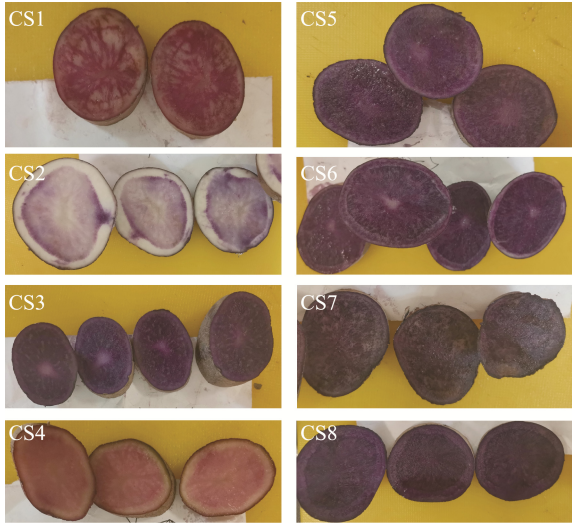


图 2 8 种彩色马铃薯的剖面色泽图
Fig.2 Sectional color map of 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L.

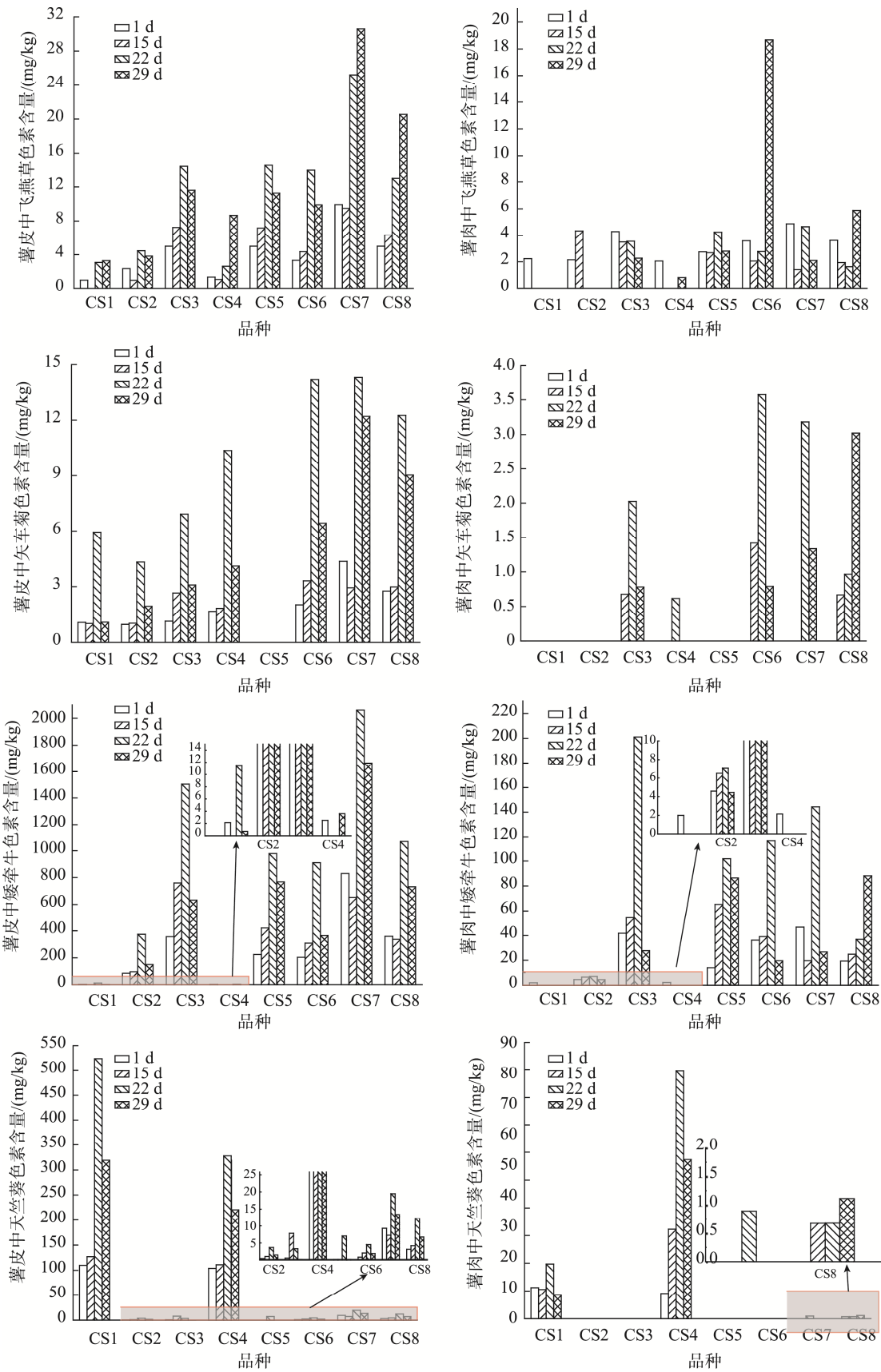


图 3 8 种彩色马铃薯各花青素贮藏过程中含量变化

Fig.3 Anthocyanidins content changes in 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. during storage

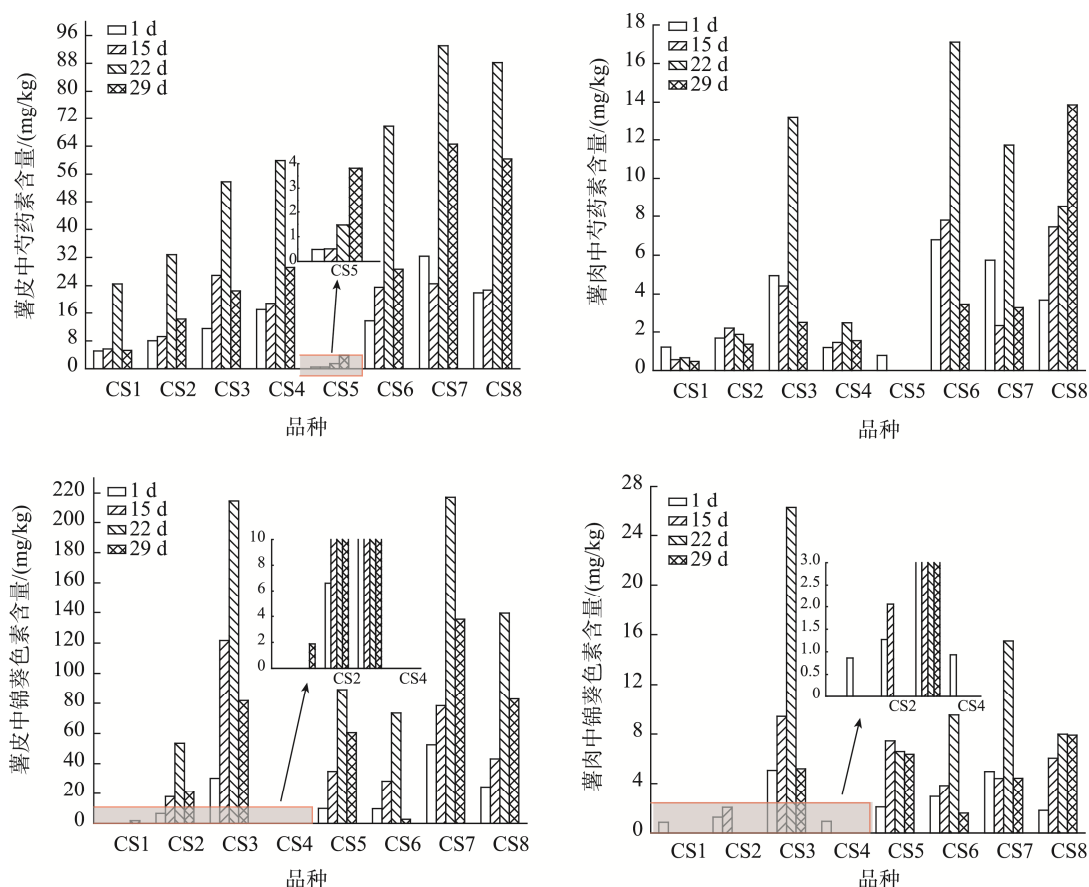


图 3(续) 8 种彩色马铃薯各花青素贮藏过程中含量变化

Fig.3 Anthocyanidins content changes in 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. during storage

CS1 在贮藏过程中, 其薯肉含有飞燕草色素、锦葵色素的含量随着时间的推移消失, 在 22 d 时薯皮部分检测到飞燕草色素, 29 d 时检测到锦葵色素; 矢车菊色素含量随着时间的推移, 一直存在于薯皮部分; 芍药素、天竺葵色素的含量随着时间推移一直存在于薯皮和薯肉部分, 块茎和薯皮中芍药素、天竺葵色素的含量在 22 d 时达到最高; 矮牵牛色素的含量由初始薯皮和薯肉中的存在, 随着时间的推移, 在 22 d 时全部在薯皮部分检测到, 且含量达到最高。

CS2 中的飞燕草色素由初始薯皮和薯肉的存在, 在 22 d 时薯肉部分未检测到; 在贮藏过程中矢车菊色素一直在薯皮部分检测到, 在 22 d 时含量达到最高; 矮牵牛色素由初始薯皮中的含量高于薯肉部分, 在贮藏过程中, 一直保持存在, 在 22 d 时块茎和薯皮的含量均达到最高; 在贮藏过程中, 天竺葵色素一直存在于薯皮部分, 22 d 时含量达到最高; 在贮藏过程中, 芍药素一直在薯皮和薯肉部分可检测到, 22 d 时块茎和薯皮的含量均达到最高; 随着贮藏时间的变化, 锦葵色素由初始薯皮和薯肉可检测到, 变为 22 d 时仅可在薯皮部分检测到, 且含量达到最高。

CS3 中含有的飞燕草色素、矮牵牛色素、芍药素、锦葵色素, 随着贮藏时间的变化, 薯皮和薯肉均可检测到, 在 22 d 时, 块茎和薯皮中飞燕草色素的含量均达到最高,

薯皮和薯肉中矮牵牛色素、芍药素、锦葵色素的含量均达到最高; 矢车菊色素随着贮藏时间的变化, 由初始薯皮可以检测到, 在 15 d 时变化为薯皮和薯肉均可检测到, 在 22 d 时薯皮和薯肉的含量均达到最高; 在贮藏过程中的天竺葵色素随着时间的变化, 一直仅在薯皮可以检测到, 15 d 时含量达到最高。

CS4 随着贮藏时间的变化, 其飞燕草色素的含量由薯皮和薯肉可检测到, 变为在薯皮可检测到, 最后又可在薯皮和薯肉检测到, 在 29 d 时块茎和薯皮的含量均最高; 矢车菊色素随着时间的变化, 由初始仅在薯皮可检测到, 在 22 d 时薯皮和薯肉都可检测到, 且含量均达到最高, 29 d 时其含量仅可在薯皮检测到; 在贮藏过程中, 矮牵牛色素由初始薯皮和薯肉均可检测到, 变为 29 d 时仅可在薯皮部分检测到; 天竺葵色素、芍药素的含量随着时间的变化, 22 d 前薯皮和薯肉均呈现升高趋势, 且达到最高, 29 d 时含量下降; 在贮藏过程中, 锦葵色素仅在前期的薯肉中可检测到, 后期一直未检出。

CS5 随着贮藏时间的变化, 飞燕草色素在 22 d 时薯皮和薯肉中的含量均达到最高, 且整个贮藏期一直可检测到; 锦葵色素、矮牵牛色素呈现出先增长后下降的趋势, 在 15 d 时薯肉的锦葵色素含量达到最高, 22 d 时薯皮和块

茎中锦葵色素的含量均达到最高, 薯皮和薯肉中矮牵牛色素的含量均达到最高; 天竺葵色素在 22 d 薯皮部分可检测到, 其他贮藏过程中, 薯皮和薯肉均未检出; 芍药素在 29 d 时薯皮和块茎中的含量达到最高。

CS6 在贮藏过程中, 薯皮中飞燕草色素的含量随着时间呈现出先增长后下降的趋势, 薯肉中飞燕草色素的含量呈现出先下降后上升的趋势, 在 22 d 时薯皮中含量达到最高, 29 d 时薯肉和块茎中的含量均达到最高; 薯肉中矢车菊色素的含量由初始未检测到, 变为和薯皮一致先增长后下降的趋势, 22 d 时薯皮和薯肉中的含量均达到最高; 矮牵牛色素、芍药素、锦葵色素在整个贮藏过程中, 薯皮和薯肉均可检测到, 呈现出先增长后下降的趋势, 在 22 d 时薯皮和薯肉中的含量均达到最高; 在贮藏过程中, 天竺葵色素仅在薯皮部分可检测到, 且 22 d 时含量达到最高。

CS7 贮藏过程中, 随着时间的变化, 薯皮中飞燕草色素呈现下降后上升的趋势, 29 d 时薯皮和块茎的含量最高, 薯肉中的含量趋势变化无规律; 薯肉中矢车菊色素的含量由初始未检测到到 22 d 时检出含量最高, 后下降, 薯皮一直可检测出矢车菊色素, 变化趋势无规律, 22 d 时薯皮和块茎中的含量达到最高; 矮牵牛色素、芍药素的含量变化趋势无规律, 但在 22 d 时薯皮和薯肉中的含量均达到最高; 薯肉中的天竺葵色素仅在 22 d 时检测出, 薯皮中的天竺葵色素无变化规律, 但在 22 d 时含量达到最高; 随着贮藏时间的变化, 薯皮中锦葵色素的含量呈现出先增长后下降的趋势, 22 d 时薯皮和薯肉含量达到最高, 薯肉中锦葵色素无明显变化规律。

CS8 薯皮中飞燕草色素的含量随着时间呈现增长的趋势, 薯肉呈现先下降后上升的趋势, 在 29 d 时, 薯皮和薯肉中的含量均达到最高; 薯皮中矢车菊色素、天竺葵色素、芍药素、锦葵色素的含量随着贮藏时间呈现先增长后下降的趋势, 在 22 d 时含量最高, 薯肉初始状态检出芍药素、锦葵色素, 未检出矢车菊色素、天竺葵色素, 随着贮藏时间的增加, 薯肉中除锦葵色素在 22 d 时含量达到最高, 天竺葵色素无变化规律, 矢车菊色素和芍药素呈现出一直增长的趋势, 29 d 时薯肉中的含量达到最高; 薯皮中矮牵牛色素的含量随着贮藏时间的变化无明显规律, 薯肉则呈现增长的趋势, 29 d 时含量达到最高; 块茎中除飞燕草色素外, 其余 5 种花青素在 22 d 时含量达到最高。

结果表明除 CS5 未检测到矢车菊色素, 其余品种在不同贮藏时期的不同部位都可检测到 6 种花青素。紫色品种 CS2、CS3、CS5、CS6、CS7 和 CS8 的主要花青素仍为矮牵牛花色素, 红色品种 CS1、CS4 的主要花青素是天竺葵色素, 与马铃薯品种的呈色一致, 表明花青素的种类和含量与马铃薯的色泽相关。不同品种彩色马铃薯中不同的花青素种类及含量在不同贮藏阶段, 其不同部位的含量均发生了变化, 在贮藏过程中 CS3 薯皮及块茎中天竺葵色素在 15 d 时含量达到最高, CS4 薯皮中矮牵牛色素在 29 d 时含量达

到最高, CS4 薯皮及块茎、CS6 薯肉及块茎、CS7 薯皮及块茎、CS8 薯皮及薯肉中的飞燕草色素在 29 d 时含量达到最高, CS5 薯皮及块茎中的芍药素 29 d 含量达到最高, 其余彩色马铃薯薯皮及薯肉中花青素的含量在 22 d 时含量达到最高。表明在贮藏过程中, 彩色马铃薯本身携带的葡糖转移酶或则转甲基酶活跃, 使得花青素种类含量出现部分转移^[29]。

3 结 论

对 8 种彩色马铃薯薯皮及薯肉中的 6 种花青素的初始含量进行测定, 发现不同品种之间花青素的含量存在差异, 薯皮含有的花青素种类普遍比薯肉含有的种类多, 8 个彩色马铃薯块茎中最少含有 4 种以上的花青素, 且薯皮含有的花青素总量比薯肉中含有的总量高, 占整个马铃薯块茎花青素总量的 82.5% 以上; 可以作为马铃薯深加工的副产物。8 种彩色马铃薯的薯皮和薯肉中均含有飞燕草色素、矮牵牛色素、芍药素这 3 种花青素, 再结合检测出的其他花青素, 形成了 8 种马铃薯各自的性状颜色。除 CS1 和 CS4 外, 其余 6 种彩色马铃薯的薯肉部分均未检测到天竺葵色素, 与彭祖茂等^[16]、白沙沙等^[19]的研究一致, 在植物中分布最少, 因此 CS1 与 CS4 可以作为天竺葵色素的来源之一。

对 8 种彩色马铃薯在贮藏过程中 6 种花青素的含量变化进行研究, 结果表明不同品种中不同部位的花青素含量会随着贮藏时间的变化而变化, 也呈现出不同的变化规律, 其中薯皮中各花青素的变化较明显, 尤其贮藏中期, 其含量呈现倍数增长; 薯肉中的各花青素含量, 无明显变化, 可能在贮藏过程中, 薯皮与空气接触, 一直进行呼吸作用, 使得花青素含量发生变化, 而薯肉因为处于薯皮的包裹中, 所进行的呼吸作用不明显导致含量变化微弱。所有品种的总花青素的含量在贮藏过程中均呈现先增长后下降的趋势, 在 22 d 达到顶峰, 且薯皮的花青素含量始终高于薯肉, 是理想的花青素来源, 同时也为马铃薯加工副产物的再利用提供思路。

本研究的不足之处是未对色泽与花青素含量之间的相互关系进行研究, 未确定色泽是否是花青素含量高低的响应; 当花青素含量增长到最高点时, 未详细明确花青素含量达到最高点的具体时间。

参考文献

- [1] 林团荣, 尹玉和, 王伟, 等. 2023 年内蒙古自治区马铃薯产业发展现状、存在问题及发展建议[C]. 马铃薯产业与大食物观, 2024.
LIN TR, YIN YH, WANG W, et al. Development status, existing problems and development suggestions of potato industry in Inner Mongolia autonomous region in 2023 [C]. Potato Ind and Big Food View, 2024.
- [2] 金黎平, 石瑛, 高明杰, 等. 基于大食物观视角的中国马铃薯产业发展路径[C]. 马铃薯产业与大食物观, 2024.

- JIN LP, SHI Y, GAO MJ, *et al.* The development path of Chinese potato industry based on the perspective of big food [C]. Potato Ind and Big Food View, 2024.
- [3] 于晓兰, 刘艳, 刘家仁. 植物花青素对肿瘤抑制作用的研究进展[J]. 实用肿瘤学杂志, 2022, 36(3): 245–249.
- YU XL, LIU Y, LIU JR. Research progress in the inhibitory effects of plant anthocyanins on tumors [J]. Pract Oncol J, 2022, 36(3): 245–249.
- [4] NAKAISHI H, MATSUMOTO H, TOMINAGA S, *et al.* Effects of black current anthocyanoside intake on dark adaptation and VDT work-induced transient refractive alteration in healthy humans [J]. Altern Med Rev, 2000, 5(6): 553–562.
- [5] 曹少谦, 徐晓云, 潘思铁. 沙棘籽原花青素对小鼠免疫功能调节作用的影响[J]. 食品科学, 2005, 26(6): 229–232.
- CAO SQ, XU XY, PAN SY. Effects of procyanidins from sea buckthorn seed on the immunity of Mice [J]. Food Sci, 2005, 26(6): 229–232.
- [6] 曹柏营, 乔新宇, 王媛媛, 等. 黑豆花青素免疫调节作用研究[J]. 现代食品, 2020, 12(24): 171–173.
- CAO BY, QIAO XY, WANG YY, *et al.* Research on immunoregulatory function of anthocyanin from black soybean [J]. Mod Food, 2020, 12(24): 171–173.
- [7] 李煦, 白雪晴, 刘长霞, 等. 天然花青素的抗氧化机制及功能活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8163–8171.
- LI X, BAI XQ, LIU CX, *et al.* Research progress on antioxidant mechanism and functional activity of natural anthocyanin [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(20): 8163–8171.
- [8] 覃悦, 杨雪莲, 吴永飞. 不同蓝莓品种的花青素抗氧化活性研究新进展[J]. 绿色科技, 2022, 24(13): 72–75.
- QIN Y, YANG XL, WU YF. Research progress on antioxidant activity of anthocyanins in different blue berry varieties [J]. J Green Sci Technol, 2022, 24(13): 72–75.
- [9] 王晗, 朱华平, 李文钊, 等. 越橘提取物中花青素分析及其体外抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 60–65.
- WANG H, ZHU HP, LI WZ, *et al.* Analysis of anthocyanin in bilberry extract and its antioxidant activity *in vitro* [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(23): 60–65.
- [10] 黄彪, 韦航, 李国良, 等. 不同品种紫薯抗氧化物质及体外抗氧化活性比较[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 226–231.
- HUANG B, WEI H, LI GL, *et al.* Comparative analysis of antioxidant compounds and antioxidant activities *in vitro* of different purple sweet potato varieties [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(24): 226–231.
- [11] 张娜娜, 刘建林, 郭欣欣, 等. 不同品种马铃薯花色苷提取物的种类鉴定及其抗氧化作用[J]. 食品科技, 2022(2): 232–238.
- ZHANG NN, LIU JL, GUO XX, *et al.* Identification of anthocyanins extract from a variety of potato and their antioxidant activities [J]. Food Sci Technol, 2022(2): 232–238.
- [12] 冯婧宇, 魏智超, 魏建宏. 原花青素对苯并[a]芘神经毒性的保护作用[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(4): 441–447.
- FENG JY, WEI ZC, WEI JH. Protective effect of proanthocyanidins on neurotoxicity of benzo[a]pyrene [J]. J Environ Occup Med, 2023, 40(4): 441–447.
- [13] 涂枫, 邵平光, 李琦, 等. 日粮添加葡萄籽原花青素对断奶仔猪生长性能、血液指标及肠道损伤的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 197–202.
- TU F, GAO PG, LI Q, *et al.* Effects of grape seed proanthocyanidins on growth performance, blood indexes and intestinal injury [J]. Jiangsu Agric Sci, 2023, 51(13): 197–202.
- [14] HOLTON TA, CORNISH EC. Genetics and biochemistry of anthocyanin biosynthesis [J]. Plant Cell, 1995, 7(7): 1071–1083.
- [15] 牛钰, 李晶, 王俊文, 等. 高等植物花青素生物合成、调控、生物活性及其检测的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(4): 978–996.
- NIU Y, LI J, WANG JW, *et al.* Research progress of anthocyanin biosynthesis, regulation, bioactivity and detection in high-erplants [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2024, 36(4): 978–996.
- [16] 彭祖茂, 邓梦雅, 严虞虞, 等. 植物中花青素含量测定及种类分布研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(17): 100–104.
- PENG ZM, DENG MY, YAN YY, *et al.* Study on the determination of anthocyanin content and its species distribution in plants [J]. Food Res Dev, 2018, 39(17): 100–104.
- [17] 韩舒楠. 不同颜色鲜食玉米品种籽粒和花丝花青素苷含量及产量研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- HAN SN. Study on the content and yield of anthocyanin in kernel and silk of different color maize varieties [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
- [18] 李梦. 彩色油菜种质花色素含量及花青素提取工艺研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- LI M. Research on pigment content and anthocyanin extraction technology of colored rapeseed germplasm [D]. Yangling: Northwest A F University, 2023.
- [19] 白沙沙, 吕品鑫, 顾海华, 等. HPLC 法测定不同种类水果中的花青素含量[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(3): 45–49.
- BAI SS, LV PX, GU HH, *et al.* Determination on anthocyanin in different kinds of fruits by HPLC [J]. Food Nutr China, 2021, 27(3): 45–49.
- [20] 陈子凡, 董莹, 何思东, 等. 蓝莓及其提取物中花青素检测方法的研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(3): 69–72.
- CHEN ZF, DONG Y, HE SD, *et al.* Research progress on the detection methods of anthocyanins in blueberry [J]. Cere Food Ind, 2021, 28(3): 69–72.
- [21] 顿倩, 彭瀚, 麦琦莹, 等. 基于液相色谱-质谱联用技术定性定量分析黑豆种皮中可溶型和结合型花青素[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 178–186.
- DUN Q, PENG H, MAI QY, *et al.* Qualitative and quantitative analysis of soluble and bound anthocyanins in black soybean seed coat by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Food Sci, 2019, 40(10): 178–186.
- [22] 李华伟, 罗文彬, 李国良, 等. 4 个彩色马铃薯品种花青素组分和含量比较分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 44–52.
- LI HW, LUO WB, LI GL, *et al.* Comparative analysis of anthocyanin components and content in four colored potato varieties [J]. Mod Food Sci

- Technol, 2024, 40(7): 44–52.
- [23] 高华杰, 李雨菲, 刚永运, 等. 紫皮豇豆(*Vigna unguiculata* L.)花色苷的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(3): 155–157, 161.
- GAO HJ, LI YF, GANG YY, *et al.* Study on anthocyanins in purple cowpea (*Vigna unguiculata* L.) [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(3): 155–157, 161.
- [24] BROWN CR, WROLSTAD R, DURST R, *et al.* Breeding studies in potatoes containing high concentrations of anthocyanins [J]. Am J Potato Res, 2003, 80(4): 241–249.
- [25] 殷丽琴, 彭云强, 钟成, 等. 高效液相色谱法测定 8 个彩色马铃薯品种中花青素种类和含量[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 143–147.
- YIN LQ, PENG YQ, ZHONG C, *et al.* Determination of anthocyanidin composition of different pigmented potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars by HPLC [J]. Food Sci, 2015, 36(18): 143–147.
- [26] 朱玉磊, 汪正鑫, 于文博, 等. 花青素药用价值研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(6): 1082–1091.
- ZHU YL, WANG ZX, YU WB, *et al.* Research progress on medicinal values of anthocyanins [J]. J Anhui Agric Univ, 2023, 50(6): 1082–1091.
- [27] 杜月娇, 贺阳, 文连奎. 山葡萄花青素超高压提取工艺优化及其组分分析[J]. 食品科学, 2017, 38(10): 258–263.
- DU YJ, HE Y, WEN LK. Optimization of ultra-high pressure extraction of anthocyanins from *Vitis amurens* rupr. and analysis of its anthocyanin composition [J]. Food Sci, 2017, 38(10): 258–263.
- [28] 刘毅强. 马铃薯品种鉴定及花青素合成的转录组-代谢组分析[D]. 张家口: 河北北方学院, 2022.
- LIU YQ. Identification of potato varieties and transcriptome metabolome analysis of anthocyanin synthesis [D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2022.
- [29] 董海涛. 马铃薯花青素合成相关基因的转录组分析及KFB家族成员的鉴定与功能研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
- DONG HT. Transcriptome analysis of genes related to anthocyanin synthesis in potato and identification and function of KFB family members [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [30] MENDEL F. Chemistry, biochemistry and dietary role of potato polyphenols [J]. J Agric Food Chem, 1997, 45(5): 1523–1540.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)

作者简介



谷如祥, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: 304067090@qq.com