

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.007

罗青青, 陈培涛, 宗继锴, 等. 甘薯叶片绿原酸及其抗氧化活性的基因型差异 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 63-71.

甘薯叶片绿原酸及其抗氧化活性的基因型差异

罗青青¹, 陈培涛¹, 宗继锴¹, 傅玉凡¹,
赵腾飞¹, 徐元江², 高纪龙¹, 秦瑞华¹

1. 西南大学 生命科学学院/重庆市甘薯工程技术研究中心, 重庆 400715; 2. 重庆市中药研究院, 重庆 400065

摘要: 在建立高效液相色谱法(HPLC)检测方法的基础上, 对 50 个甘薯基因型叶片的 6 种绿原酸组分的质量分数和叶片乙醇提取物的 ABTS, DPPH, FRAP 抗氧化能力进行了测定和分析, 以期探究甘薯叶片绿原酸组分质量分数及其抗氧化能力在基因型之间的差异, 筛选叶富含绿原酸和高抗氧化活性的种质资源. 结果表明: 甘薯叶片均含有 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3,4-diCQA, 3,5-diCQA 和 4,5-diCQA 6 种组分, 6 种组分的总质量分数每 100 g 干物质中含 310.34~5 033.86 mg, 变异系数为 50.17%, 平均值为 2 398.48 mg, 各个组分的质量分数及其总和在基因型间差异有统计学意义. 3,5-diCQA, 3,4-diCQA 和 3-CQA 共 3 种绿原酸组分是 50 个基因型叶片绿原酸的主要成分, 其质量分数在总质量分数中的占比平均值分别为 35.36%, 22.98% 和 21.54%. 叶片绿原酸提取物的 ABTS, DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁离子还原能力在基因型间差异有统计学意义, 且 3 种抗氧化能力均与绿原酸各组分质量分数和总质量分数呈极显著正相关. 通过研究与分析, 筛选出叶片富含绿原酸、高抗氧化活性的 18-11-4, 161837, 170407, 18-6-33, 18-11-5 优异种质资源, 结果为甘薯叶片绿原酸进一步研究以及相关育种工作奠定了一定基础.

关键词: 甘薯; 叶片; 绿原酸; 抗氧化活性; 种质资源

中图分类号: S531 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)10-0063-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Genotypic Differences of Chlorogenic Acids and Theirs Antioxidant Activities in Sweetpotato Leaves

LUO Qingqing¹, CHEN Peitao¹, ZONG Jikai¹, FU Yufan¹,
ZHAO Tengfei¹, XU Yuanjiang², GAO Jilong¹, QIN Ruihua¹

1. School of Life Science, Southwest University/Engineering and Technology Research Center for Sweetpotato of Chongqing, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Academy of Chinese Materia Medica, Chongqing 400065, China

收稿日期: 2023-03-17

基金项目: 财政部和农业农村部 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-10-SYZ15); 重庆市农业农村委薯类科企联合体项目.

作者简介: 罗青青, 硕士研究生, 主要从事甘薯遗传育种研究.

通信作者: 傅玉凡, 博士, 研究员.

Abstract: On the basis of establishing HPLC method for determination of the content of 6 chlorogenic acid components in sweetpotato leaves, the contents of 6 chlorogenic acid components and the antioxidant capacities of ABTS, DPPH and FRAP of ethanolic extracts from leaves of 50 sweetpotato genotypes were detected and analyzed in present study, in order to investigate the differences in chlorogenic acid content and antioxidant capacity among the genotypes, and to select germplasm resources rich in chlorogenic acid and high antioxidant activity. The results showed that all sweetpotato genotypes contained 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3, 4-diCQA, 3, 5-diCQA and 4, 5-diCQA in their leaves. The results showed that all sweetpotato leaves contained 6 fractions of 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3, 4-diCQA, 3, 5-diCQA and 4, 5-diCQA, and the total content of the 6 fractions ranged from 310.34 to 5 033.86 mg/100 g DW with a coefficient of variation of 50.17% and a mean value of 2 398.48 mg/100 g DW. Three chlorogenic acid fractions, 3, 5-diCQA, 3, 4-diCQA and 3-CQA, were the major components of chlorogenic acid in the leaves of the 50 genotypes, with mean contents of 35.36%, 22.98% and 21.54% in the total content, respectively. The ABTS, DPPH radical scavenging ability and FARP ferric ion reducing ability of chlorogenic acid extracts from leaves were highly significantly different among the genotypes, and all three antioxidant abilities were highly significantly positively-correlated with the content of each component and the total content of chlorogenic acids. “18-11-4” “161837” “170407” “18-6-33” and “18-11-5” with high chlorogenic acid and antioxidant activity were selected. The results of this study laid the foundation for further research on sweet potato chlorogenic acid in leaves and related breeding work.

Key words: sweetpotato; leaf; chlorogenic acid; antioxidant activity; germplasm resource

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 种植于世界上热带和亚热带地区的 100 多个国家, 是世界上最重要的粮食作物之一^[1]. 已有研究表明甘薯茎叶中富含蛋白质、多酚、黄酮、花青素、多糖和一些多功能营养素^[2-3], 有益于人体健康, 如抗癌、保肝、抑菌、抗艾滋病病毒和提高人体免疫力、预防糖尿病和心血管病等^[4-5]. 甘薯种植主要收获对象是块根, 只有很少部分茎叶用于牲畜饲用和人类食用, 绝大多数被丢弃, 造成了极大的资源浪费^[6].

酚类物质是广泛存在于植物中的膳食抗氧化剂, 甘薯叶中多酚化合物主要是绿原酸及其衍生物^[7]. 绿原酸 (Chlorogenic acid, CGA) 是由咖啡酸 (Caffeic acid) 与奎宁酸 (Quinic acid) 生成的缩酚酸, 是植物体内有氧呼吸过程中经莽草酸途径产生的一种苯丙素类次生代谢产物, 具有多种生物活性^[8-9], 如抗氧化作用、清除自由基、抑菌作用、抗病毒作用、调节糖脂代谢、免疫调节及抗肿瘤作用等^[10-14]. 在甘薯叶中至少包括 6 种咖啡酰奎宁酸衍生物, 分别为单咖啡酰奎宁酸 (CQA) 的 3 种异构体: 绿原酸 (3-CQA)、隐绿原酸 (4-CQA) 和新绿原酸 (5-CQA), 以及 3 种二咖啡酰奎宁酸: 异绿原酸 A (3,5-diCQA)、异绿原酸 B (3,4-diCQA) 和异绿原酸 C (4,5-diCQA). 甘薯 CGA 质量分数主要取决于遗传特性, 除此之外, 生育期对甘薯叶片中酚酸质量分数也有较大的影响, 同一基因型叶片中的 CGA 质量分数远高于块根^[15-17].

甘薯茎叶提取物具有较强的抗氧化能力, 其抗氧化能力与茎叶中的 CGA、黄酮素和矢车菊素类化合物相关, 其中与 CGA 及其衍生物的相关性最高^[16,18-19]. 如 Xu 等^[20] 通过对蒲薯 53 叶提取物进行成分与抗氧化活性分析, 表明提取物抗氧化活性的主要生物活性化合物是多酚类, 尤其是 CQA 衍生物.

目前对于甘薯 CGA 的研究主要存在供试材料偏少的问题, 且大多研究薯块, 对于较多基因型间 CGA 组分分析更为少见. 因此, 本研究通过高效液相色谱法 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 对 50 个甘薯基因型叶片中 CGA 组分的质量分数进行测定并对其抗氧化活性进行分析, 以期对甘薯高绿原酸、高抗氧化活性种质资源的筛选及功能茎叶品种的选育、甘薯茎叶营养功能食品的开发利用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的 50 个甘薯基因型来自西南大学重庆市甘薯工程技术研究中心合川农场育种基地的育成品种或育成成品系比较实验。供试基因型的编号、名称见表 1。

表 1 50 个供试甘薯基因型的编号、名称

编号	品种名称	编号	品种名称	编号	品种名称	编号	品种名称	编号	品种名称
S1	18-11-4	S11	心香	S21	浙薯 13	S31	XS161819	S41	绵薯 6 号
S2	18-11-5	S12	XS190409	S22	潮薯 1 号	S32	渝紫薯 263	S42	渝紫 7 号
S3	161837	S13	W107-3	S23	XS1526-3	S33	21-P-39	S43	商薯 19
S4	170407	S14	18-5-23	S24	渝薯 35	S34	21-F-33	S44	广薯 87
S5	18-4-24	S15	18-2-5	S25	18-6-46	S35	21-F-14	S45	忠薯 1 号
S6	渝苏 303	S16	162611	S26	济徐 23	S36	21-P-29	S46	川薯 221
S7	渝泗薯 1 号	S17	173307	S27	渝薯 27	S37	20XN130-1	S47	绵紫薯 9 号
S8	18-6-33	S18	15-8-9	S28	渝薯 15	S38	18-5-5	S48	济薯 21
S9	18-12-3	S19	XS15-12-2	S29	21-F-63	S39	21-P-35	S49	福薯 7-6
S10	QJW-1	S20	18-2-44	S30	18-6-47	S40	宁紫薯 1 号	S50	2019-1-15

1.2 方法

1.2.1 取样及样品的制备

供试材料大田移栽 100 d 时, 取甘薯藤蔓自上而下第 3~10 片新鲜无病斑、无腐烂的健康叶片, 用流水轻轻洗净泥沙杂质后, 自然晾干多余水分, 叶片于 105 ℃杀青后, 60 ℃烘干至恒质量, 粉碎, 过 100 目筛, -20 ℃密封保存备用。

参照 Zhang 等^[21]描述的方法, 略作修改。精确称取甘薯叶粉末 0.05 g, 按料液比 1:100(g/mL)与 70%乙醇混合, 于 60 ℃下超声提取 1 h, 提取 2 次, 每次的提取液 4 000 r/min 离心 40 min, 合并上清液, 经 0.22 μm 醋酸纤维膜过滤, 滤液用于 CGA 质量分数与组分测定及抗氧化能力研究。

1.2.2 CGA 质量分数与组分 HPLC 方法的建立

1.2.2.1 色谱条件: Agilent 色谱柱(型号 TC-C18, 250 mm×4.6 mm, 5 μm), 0.2%的甲酸(A)-乙腈(B)为流动相, 线性梯度洗脱: 0~5 min 为 95%~90%B, 5~45 min 为 90%~55%B, 45~50 min 为 95%B; 流速 1 mL/min, 柱温 40 ℃, 进样体积 10 μL, 紫外检测波长 327 nm。

1.2.2.2 标准品溶液的制备: 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3,5-diCQA, 3,4-diCQA, 4,5-diCQA 标准品购自美国 Sigma-Aldrich 公司, 分别称定 1.000 mg, 以 70%乙醇溶解定容后进行系列稀释, 分别配成 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 μg/mL 的系列混合标准品溶液。

1.2.2.3 系统性检验: 分别取混合标准品溶液和供试提取液, 按照 1.2.2.1 色谱条件各进样 10 μL, 记录色谱图, 分析各峰分离度, 记录峰面积和保留时间, 计算相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)值以进行系统适用性实验、精密度实验、稳定性实验。以浓度为横坐标, 峰面积为纵坐标, 进行线性关系考察。

1.2.3 供试基因型的测定

将样品提取液进样 10 μL, 按照 1.2.2.1 色谱条件进行进样分析, 得到峰面积, 计算各组分的质量分数。

1.2.4 抗氧化能力的测定

1.2.4.1 ABTS 自由基(SBTS⁺)清除能力测定: ABTS 自由基清除实验参考 Re 等^[22]描述的方法, 将 7 mmol/L ABTS⁺溶液与 2.45 mmol/L 的 K₂S₂O₈ 溶液 1:1 混合过夜反应得到 ABTS⁺储备液。将储备液稀释至在 734 nm 处达到 0.7±0.02 的吸光度以得到 ABTS⁺工作液。取 0.4 mL 提取液与 3.6 mL ABTS⁺溶液混合, 室温反应 20 min, 于 734 nm 波长下在酶标仪上测定吸光值, 并根据水溶性维生素 E

(Trolox)制成的标准曲线($Y=0.2264X+0.5316$, $R^2=0.9991$)计算清除能力.

1.2.4.2 DPPH 自由基清除能力测定: DPPH 自由基清除能力实验参照 Yamaguchi 等^[23]实验方法, 取提取液 2 mL 与 2 mL 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液混合, 室温避光反应 30 min, 于 517 nm 波长下测其吸光值, 并根据 Trolox 制成的标准曲线($Y=0.121X+5.6844$, $R^2=0.9999$)计算清除能力.

1.2.4.3 FRAP 铁离子还原能力测定: 铁离子还原能力的测定参考 Thaipong 等^[24]描述的方法, 配制 0.3 mol/L 的醋酸缓冲液(pH 值为 3.6), 10 mmol/L TPTZ, 20 mmol/L $FeCl_3$, 按 10 : 1 : 1 的比例混合配制 FRAP 试剂. 取提取液 0.4 mL 与 3.0 mL FRAP 试剂混合, 室温反应 10 min, 于 593 nm 波长下测定吸光值, 并根据 Trolox 制成的标准曲线($Y=0.0025X+0.1052$, $R^2=0.999$)计算铁离子还原能力.

1.2.5 数据处理

所有测定实验均独立重复 3 次. 采用 Microsoft Excel 2021 软件整理数据, 采用 SPSS 26.0 软件、Origin 2021 软件对数据进行分析 and 处理.

2 结果与分析

2.1 CGA 质量分数与组分的 HPLC 方法建立

2.1.1 适用性检验结果

标准品溶液与供试品提取液色谱条件进样分析结果显示, 在该色谱条件下, 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3,5-diCQA, 3,4-diCQA 和 4,5-diCQA 的组分间的分离和各个组分的基线分离均良好, 供试品色谱峰与标准品色谱峰的保留时间一致, 说明本方法专属性良好. 图 1 为 CGA 标准品混合液和代表性基因型的 HPLC 图谱.

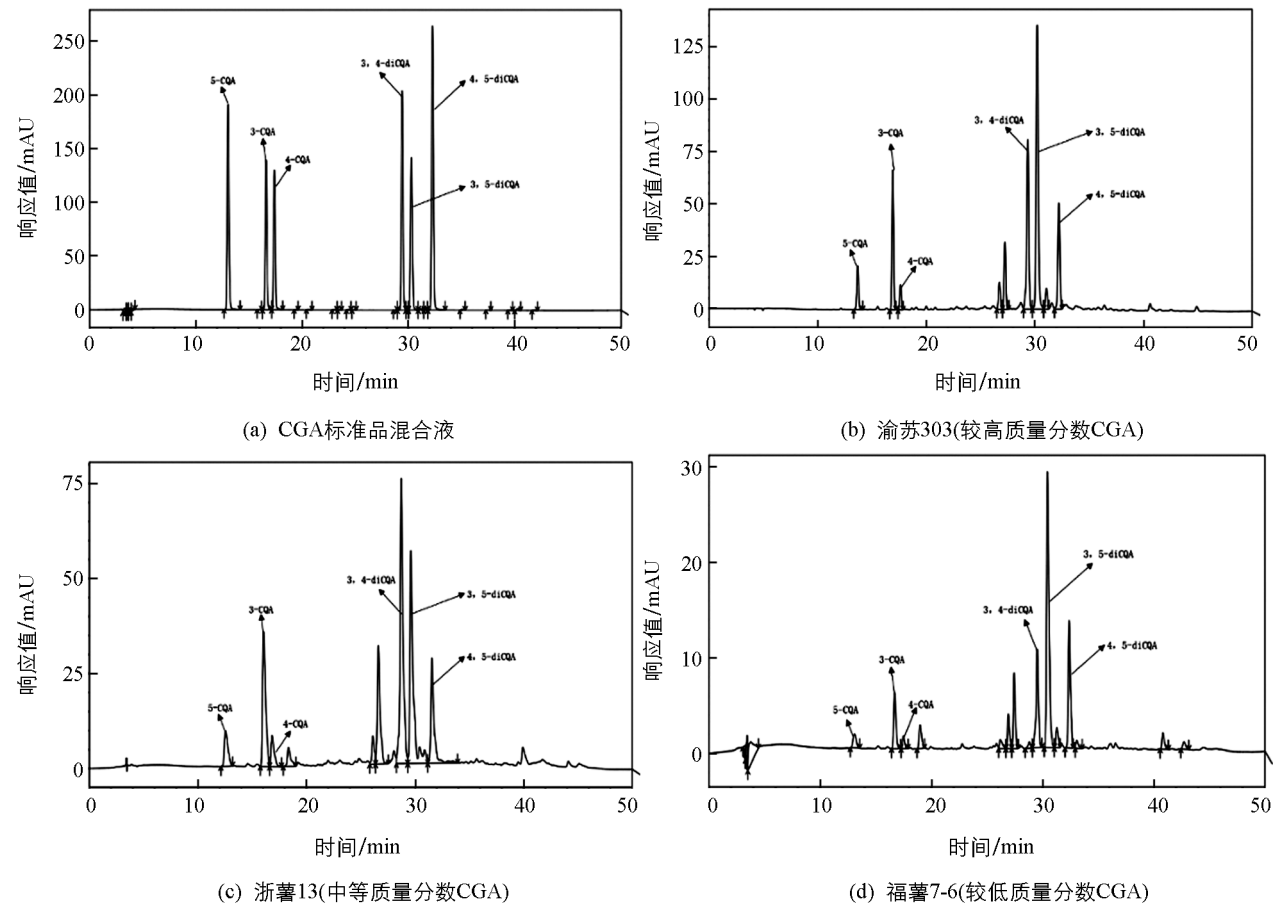


图 1 CGA 标准品混合液及代表性基因型的 HPLC 图谱

2.1.2 线性关系

以浓度为横坐标, 峰面积为纵坐标进行线性关系拟合, 结果显示 6 个标准品在 5~200 $\mu\text{g/mL}$ 浓度范围内线性关系良好(表 2).

表 2 6 个供试 CGA 标准品线性关系拟合

标准品	回归方程	R^2 值	线性范围/ $(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$
5-CQA	$Y=38\,682X-143.43$	0.999 8	5~200
3-CQA	$Y=26\,671X+6\,417.50$	0.999 9	5~200
4-CQA	$Y=24\,478X+4\,320.10$	1.000 0	5~200
3,4-diCQA	$Y=39\,535X-4\,987.50$	0.999 9	5~200
3,5-diCQA	$Y=29\,021X-1\,015.70$	0.999 8	5~200
4,5-diCQA	$Y=52\,659X-398.68$	0.999 7	5~200

2.1.3 精密度实验

取混合标准品溶液, 按照 1.2.2.1 色谱条件连续进样 6 次, 6 种标准品峰面积的 RSD 值分别为 0.08%, 0.23%, 0.46%, 0.39%, 0.14%, 0.31%, 表明仪器精密度良好.

2.1.4 稳定性实验

取标准品溶液, 分别于 0, 2, 4, 6, 8, 12, 24 h 进样 10 μL , 6 种标准品峰面积的 RSD 值分别为 0.09%, 0.31%, 0.48%, 0.41%, 0.12%, 0.28%, 表明标准品溶液在 24 h 内稳定性良好.

2.2 甘薯叶片中的 CGA 各组分质量分数与占比分析

供试基因型叶片中 5-CQA, 3-CQA, 4-CQA, 3,4-diCQA, 3,5-diCQA, 4,5-diCQA 组分和总 CGA 的质量分数统计分析结果表明, 50 个基因型叶片均有 6 种 CGA 组分, 每 100 g 干物质中 CGA 总质量分数介于 310.34~5 033.86 mg 之间, 变异系数为 50.17%, 平均值为 2 398.48 mg, 基因型间差异达到统计学意义(表 3). 以基因型 S1(18-11-4), S2(18-11-5)和 S3(161837)最高, 每 100 g 干物质中 CGA 质量分数分别为 5 033.86 mg, 4 949.57 mg, 4 941.80 mg, S49(福薯 7-6)和 S50(2019-1-15)最低, 分别为 504.65 mg, 310.34 mg.

表 3 50 个甘薯基因型叶片 CGA 各组分质量分数的统计分析

项目	CGA 组分						总 CGA/
	5-CQA	3-CQA	4-CQA	3,4-diCQA	3,5-diCQA	4,5-diCQA	mg
最大值/mg	188.22	1 445.20	286.48	1 259.79	1 804.50	547.63	5 033.86
最小值/mg	10.78	28.68	8.66	71.33	160.02	30.87	310.34
平均值/mg	90.95	537.12	130.35	564.47	822.63	252.96	2 398.48
变异系数/%	48.54	61.36	54.74	55.39	48.09	51.38	50.17
F 值	130.42	72.18	7.94	77.89	73.66	32.46	58.49
显著性	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$

注: CGA 质量分数以每 100 g 干物质计.

各 CGA 组分在总质量分数中占比的统计分析结果表明, 3,5-diCQA, 3,4-diCQA 和 3-CQA 共 3 种 CGA 组分是 50 个基因型叶片绿原酸的主要成分, 其质量分数在总质量分数中的占比平均值分别为 35.36%, 22.98%和 21.54%, 三者总占比为 79.88%. 其次为 4,5-diCQA, 4-CQA 和 5-CQA 占比较小, 后两者不足 10%(表 4).

表 4 50 个甘薯基因型叶片 CGA 组分占比的统计分析

项目	CGA 组分					
	5-CQA	3-CQA	4-CQA	3,4-diCQA	3,5-diCQA	4,5-diCQA
最大值/%	6.11	31.78	15.06	30.89	55.44	15.63
最小值/%	2.15	9.10	1.90	15.31	27.60	6.51
平均值/%	3.93	21.54	5.45	22.98	35.36	10.74
变异系数/%	19.41	25.32	29.91	16.84	17.46	20.56
F 值	52.42	95.98	10.05	307.32	268.1	104.02
显著性	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$

2.3 抗氧化活性的测定

CGA 标准品不同单体的抗氧化能力测定结果表明,6 种 CGA 单体的 3 种综合抗氧化能力由高到低依次为 4,5-diCQA,3,5-diCQA,3,4-diCQA,3-CQA,4-CQA,5-CQA(表 5)。

表 5 CGA 不同单体的抗氧化能力统计分析

标准品	ABTS	DPPH	FRAP
	$IC_{50}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	$IC_{50}/(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	$\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
4,5-diCQA	45.56	32.01	377.52 ± 14.15
3,5-diCQA	53.49	56.40	331.52 ± 1.62
3,4-diCQA	63.22	69.68	266.72 ± 1.89
3-CQA	95.25	81.55	200.45 ± 1.54
4-CQA	98.72	86.59	170.72 ± 2.43
5-CQA	123.96	73.56	144.72 ± 1.01

注:FRAP 抗氧化能力测定结果以每克样品含 Trolox 当量(TE)计; IC_{50} 为半数抑制浓度。

50 个甘薯基因型叶片提取物抗氧化能力测定结果的统计分析表明,叶片提取物的 ABTS,DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁离子还原能力在 50 个基因型间差异有统计学意义,ABTS,DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁离子还原能力最高基因型分别为最低基因型的 5.06,7.08 和 9.75 倍(表 6)。

3 种抗氧化指标排名前 5 的基因型及其 Trolox 当量(TE)见表 7,综合显示基因型 S8,S10,S3 和 S1 的综合抗氧化能力较强。

表 6 50 个甘薯基因型叶片抗氧化能力的统计分析

项目	ABTS	DPPH	FRAP
最大值 $\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	98.97	132.32	96.32
最小值 $\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	19.57	18.68	9.88
平均值 $\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	61.87	77.81	57.00
变异系数/%	27.03	33.10	34.28
F 值	73.55	71.46	685.64
显著性	$p<0.001$	$p<0.001$	$p<0.001$

注:抗氧化能力测定结果以每克样品含 Trolox 当量(TE)计。

表 7 抗氧化能力排名前 5 基因型及其 Trolox 当量(TE)

名次	ABTS		DPPH		FRAP	
	基因型编号	$\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	基因型编号	$\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	基因型编号	$\text{TE}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
1	S8	97.59	S8	128.33	S8	96.08
2	S10	95.10	S10	121.41	S1	92.88
3	S3	92.34	S25	119.44	S4	88.72
4	S1	91.04	S3	115.80	S2	86.99
5	S7	85.72	S1	112.17	S10	86.73

注:抗氧化能力测定结果以每克样品含 Trolox 当量(TE)计。

2.4 主成分分析及相关性分析

对 50 个基因型甘薯 CGA 各组分质量分数及在总质量分数中的占比, 3 种抗氧化能力共计 15 个指标进行的主成分分析(Principal components analysis, PCA)表明, 6 个 CGA 组分质量分数在总方差中贡献率达到 95.48%, 其中 5-CQA 特征值为 7.86, 方差贡献率达到 52.39%. 15 个指标可简化为特征值大于 1 的 4 个独立成分, 方差贡献率分别为 51.33%, 18.68%, 10.09% 和 8.15%, 累计贡献率为 88.25%. 主成分 1 主要是 6 种 CGA 组分质量分数指标, 载荷均高于 0.90, 其次是 ABTS, DPPH 自由基清除能力和 FARP 铁离子还原能力指标, 载荷值分别为 0.84, 0.81 和 0.95; 主成分 2 主要是 5-CQA, 3-CQA, 4-CAQ 共 3 种 CGA 质量分数占比的正向载荷和 3,5-diCQA 的负向载荷, 主成分 3 和主成分 4 分别是 3,4-diCQA 质量分数占比和 4,5-diCQA 质量分数占比的正向载荷. 50 个基因型在这 4 个主成分上综合得分值介于 0.10~3.13 之间, 排名前 10 的基因型由大到小依次为 S1, S3, S4, S8, S5, S10, S7, S2, S9, S11, 其分值介于 1.27~3.13 之间. 指标间相关性分析表明, 抗氧化活性与 CGA 各组分质量分数的占比不相关, 而与 CGA 各组分质量分数及总质量分数呈极显著正相关(数据略).

3 讨论与结论

酚类物质是植物界广泛存在的膳食抗氧化剂, 甘薯块根和茎叶中的酚酸类化合物主要是 CGA^[25-26], 包括 3 种单咖啡酰奎宁酸和 3 种二咖啡酰奎宁酸以及 1 种三咖啡酰奎宁酸(3, 4, 5-diCQA). Truong 等^[26]发现甘薯叶中的 CGA 质量分数最高, 其次是薯皮、全根和薯肉组织. 本文研究结果表明, 甘薯叶片中的 3 种单咖啡酰奎宁酸和 3 种二咖啡酰奎宁酸的质量分数及其总质量分数在基因型间差异有统计学意义, 与 Truong 等^[26]、Chen 等^[27]和 Krochmal 等^[17]的研究结论一致. 本文中的基因型 S1 叶片 CGA 总质量分数每 100 g 干物质达到 5 033.86 mg, 是基因型 S50 的 16.22 倍, CGA 等功能物质在品种之间的差异可能与在次级代谢物形成中起重要作用的遗传因素有关^[24]. 50 个基因型叶片中虽然均存在 6 种 CGA 组分, 但是各个组分在总质量分数中的占比在基因型间差异有统计学意义. 总体而言, 3,5-diCQA, 3,4-diCQA 和 3-CQA 3 种 CGA 组分是本文 50 个基因型叶片 CGA 的主要组分, 这 3 种组分占比平均值分别为 35.36%, 22.98% 和 21.54%, 三者总占比为 79.88%, 赵珊等^[28]研究 13 个甘薯基因型的组分也发现, 3,5-diCQA, 3,4-diCQA 和 3-CQA 为主要组分, 三者总占比为 79.05%.

CGA 具有较强的抗氧化能力^[25]. 已经有较多的研究表明甘薯叶片具有抗氧化活性和多种生理保健作用. 本文供试材料叶片提取物的 ABTS, DPPH 自由基清除能力和 FARP 铁离子还原能力在 50 个基因型之间差异有统计学意义, 虽然这些基因型的抗氧化能力大小排序和 CGA 总质量分数以及各组分质量分数的排序不完全一致(乙醇提取物还含有其他非 CGA 活性成分), 但是抗氧化能力与 CGA 质量分数之间总体上呈极显著正相关, 这与傅玉凡等^[29]、赵樱等^[30]对于甘薯 CGA 的 DPPH 清除能力与其质量分数呈显著或极显著正相关的研究结果类似.

鉴于甘薯叶片遗弃浪费较大的产业现实以及可利用价值潜力, 有必要开展富含 CGA 叶类甘薯新品种选育或淀粉、食用、加工类品种叶片品质改良的甘薯育种工作^[31-32]. Ning 等^[33]研究发现 CGA 的广义遗传率高达 0.84, 因此进行富含 CGA 叶类甘薯新品种选育或品种改良理论上也是可行的. 种质资源创新与利用是甘薯遗传多样性拓展的重要途径, 是品种改良的基础和保障. 许建华等^[34-35]研究表明西蒙 1 号甘薯是药用甘薯品种, 在临床上对多种出血性疾病及胰岛素非依赖型糖尿病有显著疗效, 其茎叶乙醇提取物还具有一定的体内外抗肿瘤活性; Xi 等^[18]通过对渝紫薯 7 号和西蒙 1 号叶片中的多酚质量分数和抗氧化活性的对比研究表明, 渝紫薯 7 号的多酚质量分数(甘薯茎叶中的多酚主要是 CGA^[25-26])与抗氧化能力分别是西蒙 1 号的 1.18, 1.28 倍, 是一个优异的富含 CGA 和高抗氧化能力的资源. 然而渝紫薯 7 号的 CGA 质量分数与抗氧化能力在本文 50 个基因型中分别排名第 43 位与第 42 位, 因此本研究有机会筛选出较多的比渝紫薯 7 号更富含 CGA 和抗氧化能力更强的资源, 如基因型 18-11-4, 161837, 170407, 18-6-33, 18-11-5

的 CGA 质量分数分别比渝紫薯 7 号高 3.82, 3.75, 3.35, 2.99, 3.75 倍, ABTS, DPPH 自由基清除能力和 FARP 铁离子还原能力分别比渝紫薯 7 号最少高出 1.29 倍, 1.84 倍和 1.82 倍, 因此, 这些资源可用于高 CGA、高抗氧化能力叶类利用与开发的甘薯品种的选育与改良工作。例如, 目前正在大力推广的高淀粉甘薯渝薯 27 叶片中 CGA 总质量分数每 100 g 干物质中含 2 078.90 mg, 可与叶富含 CGA 的淀粉资源 18-11-5 进行杂交育种筛选块根淀粉质量分数高、同时叶片也富含 CGA 的新品种, 对渝薯 27 进行改良, 实现薯块和叶片的综合利用, 提高单位土地面积的甘薯产业效益。

参考文献:

- [1] LIAO Y Y, ZENG L T, RAO S F, et al. Induced Biosynthesis of Chlorogenic Acid in Sweetpotato Leaves Confers the Resistance Against Sweetpotato Weevil Attack [J]. *Journal of Advanced Research*, 2020, 24: 513-522.
- [2] WANG S N, NIE S P, ZHU F. Chemical Constituents and Health Effects of Sweet Potato [J]. *Food Research International*, 2016, 89: 90-116.
- [3] WANG A M, LI R S, REN L, et al. A Comparative Metabolomics Study of Flavonoids in Sweet Potato with Different Flesh Colors (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) [J]. *Food Chemistry*, 2018, 260: 124-134.
- [4] LATTANZIO V, KROON P A, LINSALATA V, et al. Globe Artichoke: a Functional Food and Source of Nutraceutical Ingredients [J]. *Journal of Functional Foods*, 2009, 1(2): 131-144.
- [5] NAGAMINE R, UENO S, TSUBATA M, et al. Dietary Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Leaf Extract Attenuates Hyperglycaemia by Enhancing the Secretion of Glucagon-Like Peptide-1 (GLP-1) [J]. *Food & Function*, 2014, 5(9): 2309-2316.
- [6] CHEN P T, RAN H R, LI J X, et al. Antioxidant Activity of Phenolic Extraction from Different Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) Blades and Comparative Transcriptome Analysis Reveals Differentially Expressed Genes of Phenolic Metabolism in Two Genotypes [J]. *Genes*, 2022, 13(6): 1078.
- [7] 傅志丰. 红薯叶多酚的溶剂提取、消化性及体内降血脂作用研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [8] ISLAM S. Sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) Leaf: Its Potential Effect on Human Health and Nutrition [J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(2): R13-R121.
- [9] UPADHYAY R, RAO L M. An Outlook on Chlorogenic Acids-occurrence, Chemistry, Technology, and Biological Activities [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013, 53(9): 968-984.
- [10] 吴卫华, 康桢, 欧阳冬生, 等. 绿原酸的药理学研究进展 [J]. *天然产物研究与开发*, 2006, 18(4): 691-694.
- [11] DE BRUM T, ZADRA M, PIANA M, et al. HPLC Analysis of Phenolics Compounds and Antioxidant Capacity of Leaves of *Vitex Megapotamica* (Sprengel) Moldenke [J]. *Molecules*, 2013, 18(7): 8342-8357.
- [12] SASAKI K, OKI T, KOBAYASHI T, et al. Single-laboratory Validation for the Determination of Caffeic Acid and Seven Caffeoylquinic Acids in Sweet Potato Leaves [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2014, 78(12): 2073-2080.
- [13] TORRES A, NORIEGA L G, DELGADILLO-PUGA C, et al. Caffeoylquinic Acid Derivatives of Purple Sweet Potato as Modulators of Mitochondrial Function in Mouse Primary Hepatocytes [J]. *Molecules*, 2021, 26(2): 319.
- [14] CHIU C H, LIN K H, LIN H H, et al. Analysis of Chlorogenic Acid in Sweet Potato Leaf Extracts [J]. *Plants*, 2022, 11(15): 2063.
- [15] LUO C Y, WANG X X, GAO G, et al. Identification and Quantification of Free, Conjugate and Total Phenolic Compounds in Leaves of 20 Sweetpotato Cultivars by HPLC-DAD and HPLC-ESI-MS/MS [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2697-2706.
- [16] 罗霞, 魏巍, 余梦瑶, 等. 不同品种甘薯藤蔓部分活性成分含量的比较 [J]. *食品科学*, 2013, 34(10): 238-240.
- [17] KROCHMAL-MARCZAK B, CEBULAK T, KAPUSTA I, et al. The Content of Phenolic Acids and Flavonols in the Leaves of Nine Varieties of Sweet Potatoes (*Ipomoea batatas* L.) Depending on Their Development, Grown in Central Europe [J]. *Molecules*, 2020, 25(15): 3473.

[18] XI L S, MU T H, SUN H N. Preparative Purification of Polyphenols from Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Leaves by AB-8 Macroporous Resins [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 166-174.

[19] JENG T L, LAI C C, LIAO T C, et al. Effects of Drying on Caffeoylquinic Acid Derivative Content and Antioxidant Capacity of Sweet Potato Leaves [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2015, 23(4): 701-708.

[20] XU W Q, LIU L X, HU B, et al. TPC in the Leaves of 116 Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Varieties and Pushu 53 Leaf Extracts [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2010, 23(6): 599-604.

[21] ZHANG L, TU Z C, WANG H, et al. Comparison of Different Methods for Extracting Polyphenols from *Ipomoea batatas* Leaves, and Identification of Antioxidant Constituents by HPLC-QTOF-MS² [J]. Food Research International, 2015, 70: 101-109.

[22] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, 26(9-10): 1231-1237.

[23] YAMAGUCHI T, TAKAMURA H, MATOBA T, et al. HPLC Method for Evaluation of the Free Radical-scavenging Activity of Foods by Using 1, 1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1998, 62(6): 1201-1204.

[24] THAIPOONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC Assays for Estimating Antioxidant Activity from Guava Fruit Extracts [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6-7): 669-675.

[25] FRANKOVÁ H, MUSILOVÁ J, ÁRVAY J, et al. Changes in Antioxidant Properties and Phenolics in Sweet Potatoes (*Ipomoea Batatas* L.) Due to Heat Treatments [J]. Molecules, 2022, 27(6): 1884.

[26] TRUONG V D, MCFEETERS R F, THOMPSON R T, et al. Phenolic Acid Content and Composition in Leaves and Roots of Common Commercial Sweetpotato (*Ipomea Batatas* L.) Cultivars in the United States [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(6): C343-C349.

[27] CHEN J H, HO C T. Antioxidant Activities of Caffeic Acid and Its Related Hydroxycinnamic Acid Compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(7): 2374-2378.

[28] 赵珊, 仲伶俐, 李曦, 等. 超高效液相色谱测定冷冻研磨甘薯植株中酚酸及其分布 [J]. 食品科学, 2021, 42(12): 222-232.

[29] 傅玉凡, 杨春贤, 赵亚特, 等. 不同叶菜型甘薯品种茎尖绿原酸含量及清除 DPPH · 能力 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4814-4822.

[30] 赵樱, 谢小焕, 傅玉凡, 等. 甘薯苗期茎尖多酚含量对其 DPPH · 清除反应的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(2): 39-45.

[31] 李静, 傅玉凡, 黄雨, 等. 10 个叶菜型甘薯品种茎尖性状的分析与评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 45-53.

[32] ISLAM M S, YOSHIMOTO M, YAMAKAWA O. Distribution and Physiological Functions of Caffeoylquinic Acid Derivatives in Leaves of Sweetpotato Genotypes [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 111-116.

[33] NING X Y, WANG Q M, ZHANG X L, et al. Heredity of Active Compounds and Selection of Elite Hybrids in a Segregating F1 Population of Tea Chrysanthemum [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 305: 111366.

[34] 许建华, 吴国土, 叶庆林. 西蒙 1 号甘薯茎叶抗肿瘤作用的研究 [J]. 中药药理与临床, 1998, 14(6): 32-34.

[35] 许建华, 陈元麒, 吴国土, 等. 西蒙 1 号甘薯茎叶抗肿瘤的实验研究 [J]. 福建医科大学学报, 1997, 31(1): 20-22.

责任编辑 周仁惠