

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.006

冉海榕, 李佳欣, 傅玉凡, 等. 不同基因型甘薯叶片酚类质量分数及 PPO, POD 活性的差异 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 54-62.

不同基因型甘薯叶片酚类质量分数及 PPO, POD 活性的差异

冉海榕, 李佳欣, 傅玉凡, 陈培涛,
王璐璐, 黄雨, 宗继锴, 罗青青

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

摘要: 以 86 个甘薯基因型的叶片为供试材料, 研究其总多酚、绿原酸和干物质的质量分数, 多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性, ABTS 自由基清除能力在基因型间和不同的色泽与干物质质量分数群体之间的差异及其相关性, 以期为甘薯叶片相关育种与利用研究奠定一些基础. 结果表明: 甘薯叶片总多酚和绿原酸的质量分数、ABTS 自由基清除率在基因型间和不同干物质质量分数基因型群体间差异有统计学意义, 总多酚和绿原酸的质量分数及其 ABTS 自由基清除能力与叶片干物质质量分数之间呈显著正相关. PPO, POD 活性在基因型间的差异有统计学意义, 但与叶片色泽、干物质、总多酚和绿原酸的质量分数以及 ABTS 自由基清除能力间没有明显的相关性规律.

关键词: 甘薯叶片; 总多酚; 绿原酸; ABTS 自由基清除能力;

多酚氧化酶; 过氧化物酶

中图分类号: S531

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)10-0054-09

Differences of Leaf Phenolic Substances Content and PPO, POD Activities among Sweetpotato Genotypes

RAN Hairong, LI Jiaying, FU Yufan, CHEN Peitao,
WANG Lulu, HUANG Yu, ZONG Jikai, LUO Qingqing

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

Abstract: The difference and correlation of the contents of total polyphenols, chlorogenic acid and dry matter, activities of PPO, POD, ABTS⁺ scavenging capacity in leaves among 86 sweetpotato varieties and

收稿日期: 2021-09-22

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-C20); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-gks-bX0100).

作者简介: 冉海榕, 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.

populations of different color or dry matter content were studied in present paper, in order to provide a theoretical basis for the utilization of sweetpotato leaves and related breeding. The results showed that the content of total polyphenols and chlorogenic acid in leaves and the scavenging rate of ABTS⁺ free radicals were significantly different among the varieties and the populations with different dry matter content, and the contents of total polyphenols and chlorogenic acid and their ABTS⁺ scavenging capacity had significant positive correlation with dry matter content of leaves. The activities of PPO and POD were significantly different among varieties, but not obvious correlated with the leaf color, dry matter content, contents of total polyphenols and chlorogenic acid, ABTS⁺ scavenging capacity.

Key words: sweetpotato blades; total polyphenols; chlorogenic acid; 2, 2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) scavenging ability; polyphenol oxidase; peroxidase

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 是我国重要的粮食、饲料和工业原料作物之一^[1]。随着淀粉甘薯、鲜食甘薯产业规模化和专业化的发展, 块根成为主要的收获对象, 而原先被作为饲料利用的藤蔓则被大量遗弃^[2], 造成资源浪费、病虫害传播。甘薯藤蔓含有丰富的蛋白质、维生素和矿物质以及多酚、绿原酸等功能性物质^[3-4], 不仅是营养丰富的饲料和叶类蔬菜来源, 还具有预防心血管等疾病、提高人体免疫力等多种生理保健功能^[5-6], 值得重视和开发利用, 如从甘薯品种渝紫薯 7 号、西蒙 1 号中成功提取、纯化出多酚^[7]和制作饮料冲剂等^[8]。酚类物质普遍存在于植物中, 在植物生长发育、繁殖以及抗逆等过程中发挥着重要作用^[9], 但容易被多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (peroxidase, POD) 氧化成醌类物质从而降低果蔬等农产品的营养成分和商品品质, 造成经济损失^[10], 其合成与积累与 PPO, POD 的生理活性具有一定的相关性^[11]。除此之外, PPO, POD 在乙醇生产、啤酒风味陈化等食品加工、污水处理等领域也具有重要的利用价值^[12-13]。

就甘薯叶片中功能成分而言, 前人的研究多集中在酚类、绿原酸、黄酮等质量分数和组分的定性定量分析^[14-15]、抗氧化能力^[16-17]等方面, 由于检测方式、实验材料及其栽培因素的差异, 相关的研究结论具有一定的差异。关于甘薯 PPO, POD 活性的研究也往往只针对于块根, 如鲜切甘薯不同部位褐变机理差异^[18-19]、不同处理对酶活性的影响^[20]等方面, 而甘薯叶片中关于这两种酶的研究较少, 且只在少数品种中开展过两种酶的分离纯化与性质研究^[13, 21]。由于叶片是藤蔓的主要部位, 其质量占比在 50% 以上^[22], 有资料显示多酚质量分数有器官依赖性^[23], 且质量分数与绿原酸质量分数呈正相关^[24], 因此, 本文对 86 个甘薯高级育种品系叶片中多酚、绿原酸的质量分数、抗氧化能力、PPO 和 POD 活性进行测定和分析, 以期 为这些甘薯新品系的进一步鉴定、藤蔓资源的利用提供一定的数据支撑, 也为 PPO, POD 的进一步研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的 86 个甘薯新品系或基因型, 均来自于重庆市甘薯工程技术研究中心合川农场基地 2020 年的品种比较试验。供试材料的编号、名称见表 1。

表 1 86 个供试甘薯的编号、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
1	ct1-13	19	18-10-20	37	18-7-17	55	XS161842	73	18-2-21
2	18-2-57	20	173302	38	18-5-5	56	1606-11	74	18-2-17
3	18-2-18	21	170407	39	18-4-24	57	1468-6	75	160608
4	18-11-4	22	161614	40	18-3-8	58	18-6-7	76	160410
5	161010	23	161837	41	18-2-56	59	18-6-48	77	渝薯 1 号

续表 1

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
6	万 1314-6	24	161208	42	18-12-3	60	18-6-47	78	商薯 19
7	宁紫 1 号	25	160716	43	18-1-1	61	18-6-46	79	广薯 72
8	济薯 26	26	160703	44	18-11-5	62	18-6-43	80	赣薯 3 号
9	潮薯 1 号	27	忠薯 1 号	45	173307	63	18-6-39	81	15-8-9
10	161834	28	万 1426-5	46	171404	64	18-6-35	82	15-12-2
11	x88-6	29	宁紫 4 号	47	170901	65	18-6-33	83	18-6-24
12	173306	30	黄皮 27	48	161828	66	18-6-17	84	18-6-1
13	18-9-16	31	13-3-35	49	161522	67	18-2-7	85	18-2-47
14	18-8-7	32	1408-4	50	15-10-2	68	18-2-5	86	161603
15	18-7-12	33	T85-5	51	湛薯 12	69	18-2-4		
16	18-5-23	34	18-9-25	52	渝薯 27	70	18-2-44		
17	18-11-7	35	18-8-9	53	万 1724-10	71	18-2-37		
18	18-10-3	36	18-8-27	54	川紫薯 6 号	72	18-2-35		

1.2 田间试验设计

采用随机区组排列小区，重复 3 次，小区面积 20 m²，种植密度 60 000 株/hm²。试验于 2019 年 5 月 17 日至 6 月 20 日栽插，常规性施肥、中耕、除草等田间管理。

1.3 取样及其样品制备

生长期 110 d 时在品种比较试验的Ⅱ重复里取样。藤蔓自上往下第 3~4 节位采集新鲜无病斑、无腐烂的叶片，质量约 100 g，快速去除杂质、切丝、混匀后装入纸袋，置于电热恒温鼓风干燥箱于 40 ℃干燥至恒质量。烘干的样品用中草药植物粉碎机粉碎，过 100 目筛后、密封低温保存，用于多酚、绿原酸质量分数测定及 ABTS 自由基清除能力测定。

每个供试材料再随机挑选 3 株藤蔓，取其自上往下第 3~4 节位新鲜无病斑、无腐烂的叶片，快速去除杂质后称质量，锡箔纸包住液氮处理后-80 ℃保存，用于 PPO，POD 活性测定。

取样均重复 3 次。

1.4 总多酚提取与测定

标准曲线的制作：参照张文婷等^[14]的方法得到没食子酸浓度(X)与吸光度(Y)的回归方程：

$$Y = 2.8527X + 0.054 \qquad R^2 = 0.9990$$

样液制备：参照 Sun 等^[5]的方法，稍作修改。准确称取 0.200 0 g 粉末干样，加入 70%乙醇 8.0 mL，浸泡提取 16~18 h 后，超声 30 min，5 000 r/min 离心 15 min，吸上清液于 50 mL 离心管中，向残渣中加入 70%乙醇 8.0 mL 再次提取，合并 2 次提取液，于 55 ℃条件下旋蒸，用蒸馏水洗涤浓缩液，定容，得到总多酚提取待测液。

质量分数测定：取 0.20 mL 待测液，按照标准曲线的方法测定待测液吸光度。总多酚质量分数表示为每克鲜质量的没食子酸当量(gallic acid equivalent, GAE)毫克数，计算公式为

$$C_{\text{总多酚}} = (A \times V_1) / m \times B$$

式中，C_{总多酚}为总多酚的质量分数(mg/g)；A 为反应体系样液浓度(mg/mL)，由标准曲线回归方程计算可得；V₁为定容体积 50 mL；m 为称取的粉末干样 0.200 0 g；B 为叶片干物质质量分数(%)。

1.5 绿原酸的提取与测定

标准曲线的制作：参照傅玉凡等^[17]的方法得到绿原酸浓度(X)与吸光度(Y)的回归方程：

$$Y = 0.0287X - 0.0037 \qquad R^2 = 0.9990$$

样液制备：参照傅玉凡等^[17]的方法，稍作修改。准确称取 0.200 0 g 粉末干样，加入 50%乙醇 20.0 mL，

浸泡提取 20 h 后, 超声 30 min, 5 000 r/min 离心 20 min, 吸上清液于 50 mL 离心管中, 向残渣中加入 50%乙醇 20.0 mL 再次提取, 合并 2 次提取液, 定容得绿原酸待测液.

质量分数测定: 待测液稀释 20 倍后, 在 326 nm 处测定待测液吸光度. 绿原酸质量分数表示为每克鲜质量的绿原酸当量(chlorogenic acid equivalent, CAE)毫克数, 计算公式为

$$C_{\text{绿原酸}} = (A \times n \times V_2) / (m \times 1\,000) \times B$$

式中, $C_{\text{绿原酸}}$ 为绿原酸的质量分数(mg/g); n 为稀释倍数 20; V_2 为定容体积 50 mL.

1.6 ABTS 自由基清除能力测定

样品醇溶提取液的制备: 参照 1.5 方法制备 4.0 mg/mL 的醇溶提取样液.

ABTS 自由基储备液的制备: 参照 Re 等^[25]的方法. 计算使 ABTS 自由基活性降低 50%的提取液浓度后, 换算成鲜基下的半数效应浓度(EC_{50}), 分析 EC_{50} 与鲜基下的总多酚和绿原酸质量分数以及 PPO, POD 活性的相关性.

$$S = [(A_0 - A_1) / A_0] \times 100$$

式中, S 为 ABTS 自由基清除率(%), A_0 , A_1 为反应前后的吸光度.

1.7 PPO, POD 活性测定

粗酶液提取: 参照李娇洋^[26]方法.

PPO 活性的测定: 参照梁建荣^[21]的方法并稍加修改. 反应体系为 2.0 mL 磷酸缓冲液, 加入 1.6 mL 邻苯二酚, 再加入 200 μ L 粗酶液, 于 401 nm 处比色测定, 用蒸馏水作为对照, 以每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个 PPO 活性单位(U/g $\cdot$ min).

POD 活性的测定: 参照付伟丽等^[13]的方法并稍加修改. 反应体系为 2.775 mL 磷酸缓冲液, 加入 0.1 mL 愈创木酚, 0.1 mL H_2O_2 , 再加入 25 μ L 粗酶液, 于 470 nm 处比色测定, 用蒸馏水作为对照, 以每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个 POD 活性单位(U/g $\cdot$ min).

1.8 数据处理

数据的整理、计算用软件 Excel 2019, 数据的相关性分析以及方差分析采用 SPSS 26.0.

2 结果与分析

2.1 供试材料的分组

86 个基因型有 5 组叶片色泽的品种群体(BC), 即 BC1(紫绿), BC2(深绿), BC3(褐绿), BC4(绿), BC5(浅绿). 根据叶片干物质质量分数测定得到的数据, 可将 86 个品种分为 8 组干物质质量分数基因型群体(DM). 86 个基因型在 BC, DM 中的分布见表 2.

表 2 86 个甘薯基因型在叶片色泽和干物质质量分数群体上的分布

分组	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8
BC1				4, 5	3	1, 2		
BC2	7, 20	14, 21	9, 12, 13, 22, 23, 24, 25	10, 16, 17, 26	8, 15	19	6	11, 18
BC3	78, 81	80	77			79, 84, 85, 86	82, 83	
BC4	54, 57, 60, 70, 73	53, 56, 61, 64	58, 59, 68, 72	55, 62	52, 63, 65, 75, 76	51, 67, 71	69, 74	66
BC5	38, 46	32, 49	27, 28, 31, 35, 37	29, 41, 45, 48	44	39, 42	30, 33, 34, 36, 40	43, 47, 50

2.2 叶片干物质、总多酚和绿原酸的质量分数、EC₅₀ 以及 PPO, POD 活性的多重比较

2.2.1 86 个基因型间的比较

叶片干物质、总多酚和绿原酸的质量分数等 6 项指标在 86 个基因型间的变幅、平均值和变异系数如表 3. 方差分析表明鲜基叶片的这 6 项指标在 86 个基因型间均有统计学意义.

表 3 86 个甘薯基因型 6 项指标的平均值、变幅和变异系数

	干物质/ %	总多酚/ (mg · g ⁻¹)	绿原酸/ (mg · g ⁻¹)	EC ₅₀ / (mg · mL ⁻¹)	PPO 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	POD 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹)
变幅	11.90~27.30	4.69~26.84	3.25~24.11	1.41~8.58	1.47~50.23	3.02~114.94
平均值	19.30	12.66	10.51	3.98	19.91	18.81
变异系数/%	22.83	38.31	43.86	40.20	67.75	101.28

2.2.2 BC 群体内不同基因型间和 BC 群体间的比较

叶片干物质、总多酚与绿原酸的质量分数等 6 项指标在同一 BC 群体内部不同基因型之间的变幅、平均值、变异系数见表 4.

表 4 6 项指标在 BC 群体内不同基因型间的变幅、平均值、变异系数以及 BC 群体间的多重比较

BC 群体		干物质/ %	总多酚/ (mg · g ⁻¹)	绿原酸/ (mg · g ⁻¹)	EC ₅₀ / (mg · mL ⁻¹)	PPO 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	POD 活性/ (U · g ⁻¹ · min ⁻¹)
BC1	变幅	18.50~24.00	11.19~17.69	9.85~15.18	1.97~5.51	13.82~32.13	8.83~114.94
	平均值	21.20aA	14.52aA	12.81aA	3.60aA	22.68aA	41.03aA
	变异系数/%	10.14	17.49	20.84	38.33	31.38	104.46
BC2	变幅	12.10~26.85	4.69~26.84	4.05~21.29	1.70~7.04	1.95~50.23	4.21~84.67
	平均值	18.92aA	12.37aA	10.44aA	3.63aA	17.38aA	23.09bAB
	变异系数/%	21.25	45.68	43.68	35.26	88.38	85.40
BC3	变幅	13.30~24.90	6.44~19.04	4.43~17.35	1.57~7.72	1.67~42.82	3.28~79.63
	平均值	19.61aA	12.69aA	10.72aA	3.74aA	19.13aA	16.54bB
	变异系数/%	24.78	40.11	45.71	49.73	62.83	142.99
BC4	变幅	12.50~26.40	6.45~16.59	3.25~18.21	2.44~7.73	1.94~38.54	3.17~40.80
	平均值	18.28aA	11.10aA	9.24aA	4.51aA	18.58aA	13.94bB
	变异系数/%	24.07	30.18	41.45	35.92	61.68	73.89
BC5	变幅	11.90~27.30	5.21~26.29	3.42~24.11	1.41~8.58	1.47~46.17	3.02~55.89
	平均值	20.29aA	14.20aA	11.37aA	3.88aA	23.33aA	16.67bB
	变异系数/%	23.90	38.38	48.28	44.59	66.01	83.08
BC 群体间	变幅	18.28~21.20	11.10~14.52	9.24~12.81	3.60~4.51	17.38~23.33	13.94~41.03
	平均值	19.66	12.98	10.92	3.87	20.22	22.05
	变异系数/%	5.80	10.79	12.00	9.56	13.01	57.69

注: 小写字母不同表示 $p < 0.05$, 大写字母不同表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

干物质质量分数指标在群体内的变异系数相对较小, 而总多酚与绿原酸质量分数以及 EC₅₀ 指标变异系数居中, PPO, POD 活性在 BC 群体内变异系数最大. 多重比较表明, 无论哪一个 BC 群体, 6 项指标在群体内不同基因型间差异均有统计学意义(数据略).

除 POD 活性外, 其余 5 项指标在 BC 群体间差异无统计学意义. BC1 群体的 POD 活性显著高于 BC2 群体和极显著高于其余 BC 群体. POD 活性在 BC2-BC5 群体间差异无统计学意义.

2.2.3 DM 群体内不同基因型间和 DM 群体之间的比较

叶片干物质、总多酚与绿原酸的质量分数等 6 项指标在同一 DM 群体内不同基因型之间的变幅、平均值、变异系数见表 5.

表 5 6 项指标在 DM 群体内不同基因型间的变幅、平均值、变异系数以及 DM 群体间的多重比较

DM 群体		干物质/ %	总多酚/ (mg·g ⁻¹)	绿原酸/ (mg·g ⁻¹)	EC ₅₀ / (mg·mL ⁻¹)	PPO 活性/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	POD 活性/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)
DM1	变幅	11.90~13.50	5.21~12.58	3.25~8.31	4.56~8.58	7.71~46.17	4.06~41.11
	平均值	12.89aA	7.78fF	5.08fF	6.26aA	25.43aA	15.23aA
	变异系数/%	4.19	26.99	28.35	20.77	42.04	86.67
DM2	变幅	13.70~15.70	4.69~10.11	4.43~7.09	2.78~7.73	2.10~43.73	5.62~35.34
	平均值	14.69bB	7.63fF	5.91fEF	4.75bB	15.65abA	17.04aA
	变异系数/%	5.65	20.18	14.72	34.11	89.90	68.66
DM3	变幅	15.80~17.70	7.21~12.86	5.53~8.93	3.30~7.01	1.67~42.29	3.02~44.11
	平均值	16.75cC	10.02eEF	7.53eE	4.74bB	24.63aA	13.37aA
	变异系数/%	4.24	16.97	13.55	20.89	74.99	95.21
DM4	变幅	17.90~19.80	9.84~14.81	7.26~13.51	2.65~6.36	2.27~50.23	4.21~114.94
	平均值	18.84dD	11.92deDE	9.66dD	3.89bcBC	19.63abA	28.56aA
	变异系数/%	3.26	14.09	16.36	25.19	74.99	125.95
DM5	变幅	20.40~21.80	11.77~16.32	10.31~14.19	1.97~4.60	1.47~28.04	3.17~40.80
	平均值	21.2eE	13.79cdCD	12.07cC	2.92cdCD	9.26bA	19.34aA
	变异系数/%	2.53	12.04	12.26	25.34	96.22	59.46
DM6	变幅	22.10~24.10	13.56~17.94	11.48~15.22	1.69~5.51	5.01~35.56	6.89~79.63
	平均值	22.78fF	16.00bcBC	13.36cC	3.08cdCD	20.03abA	24.49aA
	变异系数/%	3.05	10.00	9.36	32.14	52.57	82.78
DM7	变幅	24.40~26.10	9.77~22.44	13.12~19.40	1.54~4.07	3.37~42.82	3.28~34.01
	平均值	25.15gG	17.09bB	16.77bB	2.64dCD	19.47abA	10.83aA
	变异系数%	2.29	23.23	11.21	32.95	76.22	86.48
DM8	变幅	26.40~27.30	11.97~26.84	15.87~24.21	1.41~3.61	4.35~45.73	13.86~55.89
	平均值	26.68hH	22.33aA	19.02aA	2.24dCD	19.86abA	25.12aA
	变异系数/%	1.09	24.50	15.87	35.27	88.32	64.69
DM 群体间	变幅	12.89~26.86	7.63~22.33	5.08~19.02	2.24~6.26	9.26~25.43	10.83~28.56
	平均值	19.87	13.32	11.18	3.82	19.25	19.25
	变异系数/%	24.86	37.91	45.26	35.60	26.44	32.57

注：小写字母不同表示 $p<0.05$ ，大写字母不同表示 $p<0.01$ ，差异有统计学意义。

DM 群体内不同基因型间的叶片干物质、总多酚与绿原酸的质量分数、EC₅₀ 的变异系数普遍低于 DM 群体间的变异系数，而 PPO 活性和 POD 活性的变异系数普遍高于 DM 群体间的变异系数. 叶片干物质、总多酚与绿原酸的质量分数、EC₅₀ 值以及 PPO，POD 活性 6 项指标在 DM 群体间的变异系数均高于 BC 群体间的变异系数. DM 群体内不同基因型间比较表明，叶片干物质、总多酚和绿原酸的质量分数以及 EC₅₀ 差异无统计学意义，而 PPO，POD 活性在群体内基因型间差异有统计学意义(数据略).

叶片干物质质量分数在两两 DM 群体之间差异有统计学意义, DM8 的总多酚与绿原酸质量分数均显著高于其他群体, DM1 与 DM2 之间的总多酚、绿原酸质量分数差异无统计学意义, 但都显著低于其他群体. DM1 的 EC_{50} 显著高于其他群体, DM5 至 DM8 群体之间的 EC_{50} 差异无统计学意义, 但都显著低于其他群体. DM1 群体的 PPO 活性最大, 与 DM5 的 PPO 活性差异有统计学意义, 与其他 DM 群体之间差异无统计学意义. POD 活性在 8 个 DM 群体之间差异无统计学意义.

2.3 相关性分析

2.3.1 总多酚质量分数与干物质和绿原酸质量分数、 EC_{50} 的相关性

总多酚质量分数与干物质和绿原酸的质量分数、 EC_{50} 的相关性如表 6(群体内不同基因型之间相关性不明显, 相关系数未列出). 在 86 个基因型之间、DM 群体间的分析尺度上, 总多酚质量分数与干物质质量分数、绿原酸质量分数均呈极显著正相关, 与 EC_{50} 呈极显著负相关; BC 群体之间, 总多酚质量分数与干物质质量分数呈极显著正相关, 与绿原酸质量分数呈显著正相关, 与 EC_{50} 呈负相关. BC2, BC3, BC4, BC5 群体内不同基因型之间的总多酚与干物质质量分数、绿原酸质量分数呈显著或极显著正相关, 与 EC_{50} (除 BC3 外)呈极显著负相关. DM 群体内不同基因型之间, 总多酚质量分数与干物质质量分数相关性不明显, 与绿原酸质量分数只在 DM1 和 DM4 群体内不同基因型之间呈显著或极显著相关性, 与 EC_{50} 只在 DM1 和 DM8 群体内不同基因型之间呈显著负相关, 而在 DM6 群体内不同基因型之间呈显著正相关.

表 6 总多酚质量分数与干物质和绿原酸质量分数、 EC_{50} 的相关性

分析尺度		86 个基因型之间	BC 群体间	DM 群体间	群体内不同基因型之间							
					BC2	BC3	BC4	BC5	DM1	DM4	DM6	DM8
总多酚与	干物质	0.85**	0.97**	0.97**	0.93**	0.82**	0.72**	0.91**	0.55	0.54	−0.15	0.54
	绿原酸	0.87**	0.95*	0.98**	0.91**	0.72**	0.75**	0.94*	0.74**	0.62*	0.04	0.53
	EC_{50}	−0.68**	−0.68	−0.90**	−0.76**	−0.54	−0.71**	−0.80**	−0.62*	−0.37	0.56*	−0.91*

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

2.3.2 绿原酸质量分数与干物质和总多酚质量分数、 EC_{50} 的相关性

绿原酸质量分数与干物质和总多酚质量分数、 EC_{50} 的相关性的趋势类似表 6(具体数据略). 在 86 个基因型之间、BC 群体间、DM 群体间的分析尺度上, 绿原酸质量分数与干物质和总多酚的质量分数呈显著或极显著关系, 与 EC_{50} 只在 86 个基因型之间和 DM 群体间呈显著或极显著负相关. BC 群体内不同基因型之间, 除绿原酸质量分数与总多酚质量分数、 EC_{50} 在 BC1 群体内相关性不明显外, 其余情况下绿原酸质量分数与干物质和总多酚质量分数呈显著或极显著正相关, 与 EC_{50} 呈显著或极显著负相关. 绿原酸质量分数与干物质质量分数只在 DM1, DM2 和 DM5 群体内不同基因型之间呈显著或极显著正相关, 与总多酚质量分数只在 DM1 和 DM4 群体内不同基因型之间呈显著或极显著正相关, 与 EC_{50} 只在 DM4 群体内不同基因型之间呈显著负相关.

2.3.3 PPO, POD 活性之间及其与干物质、总多酚与绿原酸质量分数、 EC_{50} 的相关性

86 个基因型之间、BC4 和 DM1 群体内不同基因型之间的分析尺度上, PPO 活性与 POD 活性呈显著负相关, 其余分析尺度下, PPO 活性和 POD 活性之间没有显著的相关性. PPO 活性与干物质质量分数只在 DM1 群体内不同基因型之间呈极显著负相关, 与总多酚质量分数只在 DM1 和 DM4 群体内不同基因型之间呈显著负相关, 与绿原酸质量分数只在 DM1 群体内不同基因型之间呈显著负相关. POD 活性与干物质质量分数只在 DM3 群体内不同基因型之间呈显著正相关, 与绿原酸质量分数只在 DM7 群体内不同基因型之间呈极显著负相关. PPO, POD 活性与 EC_{50} 在各种分析尺度下相关性均不明显.

3 讨论与结论

本文以甘薯藤蔓主要器官叶片为研究对象, 测定其干物质、总多酚和绿原酸质量分数, 结果表明在 86 个基因型之间差异有统计学意义. 这与 Sun 等^[5]、王永徐^[27]的研究结果相类似, 表明可以通过育种手段筛选出叶片总多酚、绿原酸高质量分数的甘薯专用基因型; 也说明在多个淀粉基因型或多个鲜食甘薯基因型相当的情况下, 可以优先选用叶片总多酚、绿原酸高的基因型, 便于综合利用.

总多酚和绿原酸质量分数虽然在 BC 群体间差异无统计学意义,但在深绿(BC2)或浅绿(BC5)群体叶片里变异系数较大,且变幅的上限值相对较高。总多酚和绿原酸质量分数在 DM 群体内不同基因型之间差异较小,但在 DM 群体间差异有统计学意义,且与杜晓华等^[28]的研究结果相类似。总多酚、绿原酸质量分数在 86 个基因型之间、BC 群体间、DM 群体间以及 BC 群体内不同基因型之间多个分析尺度下均与相应的叶片干物质质量分数呈显著或极显著正相关性。同时与梨果实^[29]、红树莓叶^[30]、黑核桃青皮^[31]、番石榴果实^[32]等研究中的总多酚质量分数与抗氧化活性呈显著的正相关相类似。甘薯叶片醇溶提取液的 ABTS 自由基清除能力与其总多酚和绿原酸的质量分数呈显著或极显著正相关,因此,可以在深绿(BC2)或浅绿(BC5)群体里筛选叶片总多酚和绿原酸质量分数较高的功能性基因型,并以叶片干物质质量分数为间接筛选指标。就本文供试材料而言,综合考虑总多酚和绿原酸的质量分数以及 ABTS 自由基清除能力的 EC_{50} 值,编号 50(BC5DM8 群体里的 15-10-2),33(BC5DM7 群体里的 T85-5),18(BC2DM8 群体里的 18-10-3)等可作为总多酚、绿原酸功能成分育种资源或进一步鉴定筛选,如 15-10-2 是一个薯块食味好的品系,而 18-10-3 是一个薯块淀粉质量分数较高的品系。值得注意的是 83 号 18-6-24,79 号广薯 72 叶片总多酚、绿原酸质量分数相对不高,但是其 EC_{50} 值相对较低,抗氧化活性较高,可能与其总多酚、绿原酸的组分种类有关系^[33],值得进一步研究。

本文 86 个基因型叶片之间的 PPO, POD 活性变幅较宽,变异系数较大,高低相差约 35 倍,PPO 和 POD 活性与叶片色泽、干物质质量分数以及总多酚和绿原酸质量分数仅在部分群体内有相关性,且没有明显规律可循。这可能与 PPO, POD 活性与遗传、植物代谢和环境等因素的关系较为复杂有关^[34],如植物酚类物质代谢途径涉及到酶的种类繁多,有时并不只与 PPO, POD 两个酶^[35]有关,而且 POD, PPO 除了能够将酚类物质氧化成醌类物质外,还参与了木质素前体的聚合作用^[36-37]。本文中编号 17(18-11-7),43(18-1-1),46(171404)的 PPO 活性相对较高,编号 5(161010),10(161834),84(18-6-1)的 POD 活性相对较高,可进一步提取分离纯化^[13, 21]或作为种质资源在甘薯育种中加以利用。

参考文献:

- [1] 王欣,李强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 483-492.
- [2] 欧行奇,卫秀英,李新华. 不同甘薯品种茎尖重量及形态结构比较分析 [J]. 湖北农业科学, 2008, 47(9): 1010-1012.
- [3] NGUYEN H C, CHEN C C, LIN K H, et al. Bioactive Compounds, Antioxidants, and Health Benefits of Sweet Potato Leaves [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(7): 1820.
- [4] 李坤培,张启堂. 甘薯生物学 [M]. 重庆:西南师范大学出版社, 2020.
- [5] SUN H N, MU T H, XI L S, et al. Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Leaves as Nutritional and Functional Foods [J]. Food Chemistry, 2014, 156: 380-389.
- [6] WANG S N, NIE S P, ZHU F. Chemical Constituents and Health Effects of Sweet Potato [J]. Food Research International, 2016, 89: 90-116.
- [7] 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.
- [8] LUO D, MU T H, SUN H N, et al. Optimization of the Formula and Processing of a Sweet Potato Leaf Powder-based Beverage [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(6): 2680-2691.
- [9] IGNAT I, VOLF I, POPA V I. A Critical Review of Methods for Characterisation of Polyphenolic Compounds in Fruits and Vegetables [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1821-1835.
- [10] 李京赞,刘玉德,石文天,等. 植物果蔬的褐变及抑制的研究 [J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 63-68.
- [11] 赵铭钦,陈红华,陈秋会,等. 不同陈化条件下烤烟多酚类物质的动态变化及其与化学成分的相关分析 [J]. 中国烟草学报, 2007, 13(4): 16-18, 30.
- [12] 王馨雨,杨绿竹,王婷,等. 植物多酚氧化酶的生理功能、分离纯化及酶促褐变控制的研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(9): 222-237.
- [13] 付伟丽,唐靓婷,王松,等. 甘薯叶过氧化物酶的分离纯化及其部分性质研究 [J]. 食品科学, 2010, 31(7): 223-227.
- [14] 张文婷,钮福祥,孙健,等. 不同品种甘薯叶片和块根中多酚含量的测定 [J]. 现代农业科技, 2020(18): 200-202.
- [15] 向昌国,李文芳,聂琴,等. 甘薯茎叶中绿原酸提取方法的研究及含量测定 [J]. 食品科学, 2007, 28(1): 126-130.

- [16] FU Z F, TU Z C, ZHANG L, et al. Antioxidant Activities and Polyphenols of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Leaves Extracted with Solvents of Various Polarities [J]. Food Bioscience, 2016, 15: 11-18.
- [17] 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.
- [18] 王礼群, 刘硕, 杨春贤, 等. 鲜切甘薯不同部位褐变机理差异 [J]. 食品科学, 2018, 39(1): 285-290.
- [19] LIM W Y, CHEUN C F, WONG C W. Inhibition of Enzymatic Browning in Sweet Potato (*Ipomoea batatas* (L.)) with Chemical and Natural Anti-Browning Agents [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): e14195.
- [20] 刘军伟, 胡志和. 超高压处理对紫甘薯中多酚氧化酶活力的影响 [J]. 食品科学, 2012, 33(15): 262-265.
- [21] 梁建荣. 甘薯叶多酚氧化酶的分离纯化及部分性质与功能基团研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [22] FU Y F, WANG W Q, WU J Y, et al. Yield Composition Analysis of Vine Tip of Leaf-vegetable Sweetpotato [J]. Agricultural Science & Technology, 2009, 10(3): 88-91.
- [23] 杨显斌. 叶菜型甘薯茎尖的主要营养及其生理保健功能 [J]. 科技资讯, 2010, 8(33): 137-138.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 李娇洋. 预冷结合气调对低温贮藏期间沙葱生理特性和品质变化的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [27] 王永徐. 甘薯茎叶主要抗氧化功能成分的提取及其品种间差异研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [28] 杜晓华, 胡项绩, 揭雨成, 等. 不同种质苕麻嫩叶中绿原酸产量比较 [J]. 草业科学, 2012, 29(5): 837-840.
- [29] 姜喜, 唐章虎, 吴翠云, 等. 3 种梨果实发育过程中酚类物质及其抗氧化能力分析 [J]. 食品科学, 2021, 42(23): 99-105.
- [30] 贾仕杰, 张海华, 张焕, 等. 东北 6 种红树莓叶酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析 [J]. 食品科学, 2019, 40(20): 227-233.
- [31] WENZEL J, STORER SAMANIEGO C, WANG L, et al. Antioxidant Potential of Juglans Nigra, Black Walnut, Husks Extracted Using Supercritical Carbon Dioxide with an Ethanol Modifier [J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(2): 223-232.
- [32] THAIPONG 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.
- [33] TANAKA M, ISHIGURO K, OKI T, et al. Functional Components in Sweetpotato and Their Genetic Improvement [J]. Breeding Science, 2017, 67(1): 52-61.
- [34] ARAJI S, GRAMMER T A, GERTZEN R, et al. Novel Roles for the Polyphenol Oxidase Enzyme in Secondary Metabolism and the Regulation of Cell Death in Walnut [J]. Plant Physiology, 2014, 164(3): 1191-1203.
- [35] 史斌斌. 铁核桃多酚类物质含量与抗氧化活性、代谢相关酶活性的关系 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [36] 蒋选利, 李振岐, 康振生. 过氧化物酶与植物抗病性研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 124-129.
- [37] 胡瑞波, 田纪春. 小麦多酚氧化酶研究进展 [J]. 麦类作物学报, 2004, 24(1): 81-85.

责任编辑 周仁惠