

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.05.005

不同基因型甘薯块根褐变度的差异分析

李佳欣, 冉海榕, 傅玉凡, 陈培涛,
黄雨, 王璐璐, 罗青青, 宗继锴

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: 甘薯块根在收获、运输、加工和储存过程中存在因创伤而褐变的现象, 影响了鲜薯的商品性和加工成品的品质。对 87 份甘薯基因型之间的块根褐变度(BD)差异及其与块根干物质质量分数、薯皮薯肉的过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)的相关性进行研究, 结果表明: 甘薯块根褐变度不仅在基因型间存在差异, 而且以紫肉群体、橘红肉群体里的基因型的 BD 值相对较大。相关性分析表明: 在干物质质量分数相同的情况下, 薯肉褐变度与薯肉明度(L^*)显著负相关、与红绿色彩(a^*)显著正相关; 在色度值相同的情况下, 薯肉褐变度与干物质质量分数显著正相关, 与 POD, PPO 活性有一定正相关。

关键词: 甘薯; 块根; 褐变; 干物质质量分数; 过氧化物酶;
多酚氧化酶

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)05-0048-09

Diversity Analysis of Browning of Sweetpotato Storage Roots of Different Genotypes

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

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

Abstract: The characteristics of browning due to wounding in the process of harvesting, transportation, processing and storing of sweetpotato storage roots affect the commodity of fresh storage roots and quality of processed products. In this paper, the differences in browning degree (BD) of the 87 sweetpotato genotypes and their differences on the dry matter content of the storage roots, activities of peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) were investigated. The results showed that the BD of sweetpotato storage

收稿日期: 2021-09-28

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(cstc2019jsex-gkx-bX0100).

作者简介: 李佳欣, 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。

roots not only differed between genotypes, but also the BD between the genotypes in purple group and orange-red group was relatively large. Correlation analysis showed that with the same dry matter content, the BD of storage root was significantly negatively correlated with L^* and significantly positively correlated with a^* . Under the same chromaticity value, storage root browning degree was significantly positively correlated with the dry matter content, but not significantly positively correlated with enzyme activities of POD and PPO.

Key words: sweetpotato; storage root; browning; dry matter content; peroxidase; polyphenol oxidase

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 是一种高产稳产、营养丰富、用途广泛的重要农作物^[1], 富含淀粉^[2]、蛋白质、膳食纤维、维生素且具有增强免疫力、抗氧化、抗心血管疾病和抗肿瘤等药理作用^[3]. 随着人们饮食结构多元化和保健化需求的发展, 甘薯的健康价值越来越受到广大消费者的重视.

褐变是果蔬等农产品因机械、虫害、鼠咬等创伤而变褐色的一种生化过程, 其中多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)是引起果蔬褐变的主要酶^[4]. 果蔬在受到损伤时, 褐变相关酶与酚类物质的区域化状态被破坏, 使酚类被氧化成邻醌类化合物, 最后变成深褐色的物质, 从而导致褐变的发生^[5], 进而影响农产品及其加工品的外观、食用口感和营养品质^[6]. 甘薯块根在采收、运输、加工和储存等过程中也经常存在着褐变现象, 造成甘薯资源的浪费, 影响甘薯产业的发展.

引起褐变的因素是复杂的, 在不同物种中, 导致酶促褐变的相关酶、酚类物质、活性氧等条件都有很大差异^[7]; Fukuoka 等^[8]发现甘薯褐变区域 PPO 活性、酚类物质质量分数较高; 也有研究显示甘薯褐变具有组织特异性, PPO 是引起薯皮褐变的主要原因, POD 主要引起薯肉组织褐变^[9]; 冯程程等^[10]研究表明, PPO 和 POD 是引起鲜切紫甘薯褐变的关键酶. 前人对于甘薯褐变的研究多数只针对 1 个或几个品种, 鲜有关于块根褐变度在不同基因型育种材料之间差异的研究报道, 因此, 本研究以西南大学重庆市甘薯工程技术研究中心甘薯育种进程中 87 个不同块根肉色、不同干物质质量分数的育种材料品系(少量材料为品种)作为供试材料, 测定和分析其褐变度, 以期为这些育种材料的进一步鉴定提供参考, 也为甘薯抗褐变育种的进一步理论研究奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

87 份供试材料来自西南大学重庆市甘薯工程技术研究中心合川实验农场育种基地, 它们的编号与名称见表 1.

1.2 田间试验设计

田间试验均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, 于 10 月 28 日~11 月 10 日期间收获. 常规性施肥、中耕、除草等田间管理.

1.3 块根薯肉色度值与干物质质量分数的样品处理与测定

品种(系)比较试验收获时, 随机选取 3 个甘薯典型特征的块根鲜样, 流水洗净、晾干, 纵切后立即用 CM-2300D 美能达色差计对薯肉(flesh color, FC)剖面的上、中、下 3 个不同位点进行测定, 可得到每个测定点的 L^* (明度), a^* (红绿色彩), b^* (黄蓝色彩), C(饱和度)和 h° (色调)5 个色度指标值. 3 个块根平均值为该品种块根薯肉色度值. 纵切后的块根各取半边切成 2 mm³ 薯粒, 充分混匀后取 100 g, 60 °C 烘 48 h 后, 再 105 °C 烘干至恒质量, 然后称量, 重复 3 次.

块根干物质质量分数(D_c)计算公式:

$$D_c = D_m / F_m \times 100\%$$

式中, D_m 为薯粒干质量(g), F_m 为薯粒鲜质量(g).

表 1 87 份供试甘薯品种(系)的编号、名称

编号	品种名称	编号	品种名称								
1	18-2-18	16	18-2-57	31	18-11-4	46	18-2-37	61	18-10-3	76	赣薯 3 号
2	18-6-41	17	湛薯 12	32	18-5-5	47	18-6-17	62	18-6-46	77	万 1314-6
3	161603	18	161208	33	160608	48	160716	63	18-6-7	78	川紫薯 6 号
4	161837	19	13-3-35	34	CT1-13	49	18-8-27	64	18-2-47	79	宁紫 1 号
5	18-2-17	20	15-8-9	35	170901	50	18-6-43	65	18-2-4	80	161010
6	15-10-2	21	18-2-5	36	171404	51	161842	66	18-4-24	81	161834
7	18-6-1	22	1426-5	37	173307	52	1724-10	67	18-10-20	82	x88-6
8	18-3-8	23	济薯 26	38	161828	53	忠薯 1 号	68	18-8-9	83	161522
9	18-2-35	24	18-2-7	39	18-11-7	54	广薯 72	69	18-2-21	84	161614
10	18-6-39	25	商薯 19	40	18-2-44	55	170407	70	渝薯 27	85	160410
11	18-6-47	26	1606-11	41	173302	56	18-6-35	71	渝薯 1 号	86	18-7-12
12	18-12-3	27	1408-4	42	18-2-56	57	18-6-24	72	18-6-33	87	宁紫 4 号
13	18-9-25	28	18-7-17	43	160703	58	T85-5	73	18-1-1		
14	18-5-23	29	18-9-16	44	173306	59	黄皮 27	74	潮薯 1 号		
15	18-6-48	30	1468-6	45	18-8-7	60	18-11-5	75	15-12-2		

1.4 褐变度与酶活测定的样品处理

品种比较试验收获时,选取大小相近、无病虫害与机械损伤的甘薯块根,流水洗净、晾干,用小刀剥下甘薯块根外层界限明显、约 2 mm 厚的周皮,即薯皮,剩余部分为薯肉。每个品种分别取 3 个块根,将薯皮和薯肉分别切成 2 mm³ 的薯皮粒和薯肉粒,用液氮速冻后分开存储,放入 -80 ℃ 的冰箱中用于测定褐变度和酶活性。

1.5 褐变度的测定

褐变度(browning degree, BD)的测定参考刘硕等^[11]的消光值法并稍作修改。随机取 2.0 g 薯皮粒或薯肉粒样品,加入预冷蒸馏水中充分研磨,于 4 ℃, 5 000 r/min 离心 15 min,取上清液于 37 ℃ 水浴保温 15 min,在 410 nm 波长处测定吸光度(A),以 A₄₁₀ 表示褐变度。

1.6 PPO, POD 活性的测定

PPO 和 POD 活性测定方法参考汤绍虎等^[12]的方法并稍作改进。称取 2.0 g 薯皮粒或薯肉粒样品,加入 10 mL 磷酸缓冲液(50 mmol/L, pH 值为 6.8),在冰浴条件下研磨成匀浆,于 4 ℃, 5 000 r/min 离心 15 min,上清液即为酶提取液,低温保存备用。

PPO 活性测定:酶活力测定体系为 3.8 mL,包括 2 mL 磷酸缓冲液,1.6 mL 0.1 mol/L 邻苯二酚,200 μL 酶液。在 401 nm 处每间隔 10 s 记录 1 次吸光值,共计 60 s。在测定条件下每分钟每克样品引起 A₄₀₁ 变化 0.01 为 1 个多酚氧化酶的活力单位[U/(g·min)]。

POD 活性测定:酶活力测定体系为 3 mL,包括 2.775 mL 磷酸缓冲液,100 μL 1% H₂O₂, 100 μL 4% 愈创木酚,25 μL 酶液。在 470 nm 处间隔 30 s 记录 1 次吸光值,共计 60 s。以每分钟每克样品引起 A₄₇₀ 变化 0.01 为 1 个过氧化物酶的活力单位[U/(g·min)]。

1.7 数据处理

利用 Excel 2010 对数据进行整理和计算,利用 SPSS 23.0 进行方差分析、聚类分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 87 份品种(系)块根的薯肉色度值和块根干物质质量分数的群体分组

块根薯肉色度值 5 个指标在 87 份供试材料之间差异有统计学意义(数据略)。块根薯肉 5 个色度值指标的聚类分析把 87 份供试材料分为白肉色(FC1 和 FC2)、淡黄肉色(FC3 和 FC4)、黄肉色(FC5 和 FC6)、橘黄肉色(FC7)、橘红肉色(FC8 和 FC9)和紫肉色(FC10 和 FC11)6 个大类和 11 个小类的肉色群体(FC 群体)。87 份供试材料块根的干物质质量分数介于 16.05%~38.83%之间,平均值为 29.44%,

变异系数为 17.66%, 方差分析表明供试材料间差异有统计学意义(数据略), 对块根干物质质量分数数据进行分组, 87 份供试材料分为 9 个干物质质量分数群体(DM 群体), 具体分布情况见表 2.

表 2 87 份供试甘薯品种(系)在肉色群体和干物质质量分数群体的分布

		DM 群体数据组限及其所属品种编号								
		DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
DM 下限/%		16.00	18.54	21.08	23.62	26.16	28.70	31.24	33.78	36.32
DM 上限/%		18.54	21.08	23.62	26.16	28.70	31.24	33.78	36.32	38.86
群体编号	FC1			28		29	25, 27	61	67, 76	24
	FC2			2, 63		58	64	60, 68	30	12, 26, 59, 70
	FC3	74	47		66	7, 10, 56	11, 22	62, 72	16, 17, 69, 71, 73	21
	FC4			23		3	13	15		75
	FC5					57		8	18, 48, 53	
	FC6		6		1, 41	5, 40, 50	9, 14	52, 65		
	FC7	45				19, 46	20, 31, 34, 49, 51, 54			
	FC8			35, 37	36, 44, 55		43			
	FC9			32, 42	4, 33, 38	39				
	FC10				78		82	77, 80, 86	81	
	FC11			85		79	84	83, 87		

注: DM 下限包括本值.

2.2 块根薯肉色度值在 FC 品种(系)群体间的差异

块根薯肉色度值 5 个指标在 11 个 FC 品种群体间的多重比较结果见表 3.

表 3 块根薯肉色度值在 11 个 FC 甘薯品种(系)群体之间多重比较

肉色群体		薯肉色度值									
		L^*	a^*	b^*	C	h^0					
白肉色	FC1	87.45	aA	-0.49	hiGH	15.30	fF	15.32	hH	91.83	bcBC
	FC2	87.16	aA	-1.38	iH	22.95	eE	23.00	gG	93.52	bB
淡黄肉色	FC3	85.12	abAB	0.31	hiGH	30.53	dD	30.59	fF	89.59	cdCD
	FC4	84.48	abAB	1.11	hG	36.54	cC	36.59	eE	88.36	dD
黄肉色	FC5	82.19	bcBC	6.67	gF	38.50	cC	39.11	deDE	80.13	eE
	FC6	79.68	cCD	13.08	fE	38.34	cC	40.68	dCD	71.40	fF
橘黄肉色	FC7	76.49	dD	20.28	eD	38.31	cC	43.44	cC	62.16	gG
橘红肉色	FC8	71.83	eE	27.75	dC	41.77	bB	50.18	bB	56.50	hH
	FC9	68.19	fE	34.61	bA	47.48	aA	58.77	aA	53.95	iH
紫肉色	FC10	26.83	hG	36.91	aA	-7.19	gG	37.86	eDE	349.42	aA
	FC11	31.45	gF	31.16	cB	-5.35	gG	32.85	fF	350.33	aA

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

结果表明, 5 项色度值指标在 11 个 FC 品种群体之间差异有统计学意义. 总体来看, 非紫肉品种群体

块根肉色色度值指标 L^* 和 h^0 的数值从 FC1 到 FC9 逐渐减小, 而 a^* , b^* 和 C 的数值逐渐增加; FC10 和 FC11 的紫肉品种(系)群体 L^* 值在橘红肉色 L^* 值的基础上继续减小, 紫肉品种薯肉其 b^* 值全部为负, 其 h^0 值在非紫肉品种(系) h^0 值的基础上极显著增加。

2.3 块根 POD 活性、PPO 活性和 BD 值在品种群体间的差异

2.3.1 在 FC 品种(系)群体间的差异

POD 活性、PPO 活性和 BD 值 3 个指标在 11 个 FC 品种(系)群体之间的多重比较分别见表 4 至表 6。

就 POD 活性而言, 紫肉色 FC11 群体的薯皮 POD 活性最高, 显著高于橘黄肉色和橘红肉色的 FC7-FC9 群体, 与 FC1-FC6 群体以及 FC10 群体差异无统计学意义; FC1-FC10 群体之间的 POD 活性差异无统计学意义。薯肉 POD 活性在 11 个 FC 群体之间差异无统计学意义, FC3 群体 POD 活性相对最高, FC8 群体 POD 活性相对最低。

就 PPO 活性而言, 紫肉 FC11 群体薯皮 PPO 活性最高, 与 FC4 群体差异无统计学意义, 显著高于其他群体; FC8 和 FC9 群体薯皮里 PPO 活性相对较低, 显著低于 FC11 和 FC4 群体; FC1 至 FC3 群体之间、FC5 至 FC10 群体之间差异无统计学意义; FC4 群体薯肉里的 PPO 活性最高, FC8 群体薯肉里的 PPO 活性显著低于 FC4, FC11 和 FC5 群体; 其他群体之间差异无统计学意义。

就 BD 值而言, FC10 群体的薯皮、薯肉的 BD 值均极显著高于其他群体, 然后是 FC11 和 F9; FC5 的薯皮 BD 值最小, FC2 的薯肉 BD 值最小, 与 FC1 至 FC8 的差异无统计学意义。方差分析表明(数据略), 皮部的褐变强度显著高于薯肉的褐变强度。

表 4 11 个 FC 甘薯品种(系)群体的 POD 活性平均值及其多重比较

部位	肉色群体										
	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11
薯皮/[U·(g·min) ⁻¹]	39.89	41.55	40.56	30.00	24.98	33.07	20.56	17.57	23.55	29.84	48.63
	abA	abA	abA	abA	abA	abA	bA	bA	bA	abA	aA
薯肉/[U·(g·min) ⁻¹]	4.84	3.39	6.39	3.19	2.22	6.33	1.59	0.72	2.08	3.11	2.04
	aA										

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

表 5 11 个 FC 甘薯品种(系)群体的 PPO 活性平均值及其多重比较结果

部位	肉色群体										
	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11
薯皮/[U·(g·min) ⁻¹]	5.66	6.17	8.90	11.39	9.21	7.89	6.94	2.60	3.11	7.54	16.88
	bcB	bcB	bcAB	abAB	bcAB	bcAB	bcAB	cB	cB	bcAB	aA
薯肉/[U·(g·min) ⁻¹]	3.04	3.39	3.07	7.76	3.81	2.15	0.84	0.33	2.20	1.66	4.54
	bcdBC	bcdBC	bcdBC	aA	bcBC	bcdBC	cdBC	dC	bcdBC	bcdBC	bAB

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

表 6 11 个 FC 甘薯品种(系)群体的 BD 平均值及其多重比较结果

部位	肉色群体										
	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11
薯皮	0.51	0.48	0.50	0.50	0.41	0.51	0.60	0.53	0.76	1.10	0.82
	cD	cD	cD	cD	cD	cD	cCD	cD	bBC	aA	bB
薯肉	0.21	0.20	0.21	0.23	0.25	0.26	0.27	0.26	0.38	0.95	0.75
	dD	dD	dD	dD	dD	dCD	dCD	dCD	cC	aA	bB

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

2.3.2 在 DM 品种群体间的差异

由于 DM1 和 DM2 群体都只有 2 个品种, 因此没有进入群体之间的多重比较. 薯皮和薯肉的 POD 活性、PPO 活性和 BD 值在 DM3 至 DM9 群体间的多重比较结果见表 7 至表 9.

块根 POD 活性在 DM 群体间没有明显变化规律, 但也有随干物质质量分数增加而增大的趋势. DM7 群体薯皮 POD 活性显著高于 DM3, DM4 和 DM6 群体, 这 4 个群体与 DM5, DM8 和 DM9 群体差异无统计学意义. 薯肉 POD 活性在 DM 群体间差异无统计学意义.

对于 PPO 活性而言, 薯皮 PPO 活性在 DM 群体之间差异无统计学意义. DM7 群体薯肉 PPO 活性显著高于 DM3 群体, 两者与其余 5 个 DM 群体差异无统计学意义.

薯皮以 DM7 群体褐变度 BD 值最高, 显著高于 DM9 群体, 两者与其他群体差异无统计学意义. 薯肉也以 DM7 群体的 BD 值最高, 显著高于 DM3, DM5, DM8 和 DM9 群体; DM9 群体的薯皮与薯肉 BD 值均相对最低.

表 7 9 类甘薯 DM 群体的 POD 活性平均值及其多重比较结果

部位	干物质质量分数群体								
	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
薯皮/[U·(g·min) ⁻¹]	35.50	19.38	22.78	29.24	31.63	25.55	48.94	36.49	39.62
	/	/	bB	bAB	abAB	bAB	aA	abAB	abAB
薯肉/[U·(g·min) ⁻¹]	5.38	0.77	1.68	3.97	4.53	1.87	6.55	4.21	3.42
	/	/	aA						

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

表 8 9 类甘薯 DM 群体的 PPO 活性平均值及其多重比较结果

部位	干物质质量分数群体								
	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
薯皮/[U·(g·min) ⁻¹]	6.79	2.79	5.68	6.63	9.06	6.54	10.75	7.19	7.48
	/	/	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA
薯肉/[U·(g·min) ⁻¹]	0.91	1.22	1.58	2.57	2.87	2.07	4.62	2.65	4.22
	/	/	bA	abA	abA	abA	aA	abA	abA

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

表 9 9 类甘薯 DM 群体的 BD 平均值及其多重比较结果

指标	干物质质量分数群体								
	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
薯皮	0.47	0.72	0.54	0.63	0.54	0.61	0.71	0.54	0.44
	/	/	abA	abA	abA	abA	aA	abA	bA
薯肉	0.23	0.27	0.28	0.38	0.28	0.30	0.50	0.29	0.20
	/	/	bAB	abAB	bAB	abAB	aA	bAB	bB

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

2.4 相关性分析

2.4.1 甘薯块根薯肉薯皮 BD 值与薯肉色度值之间的相关性分析

甘薯块根 BD 值在不同分析尺度上与色度值之间的相关性分析结果如表 10.

11 个紫肉品种间, 薯肉 BD 值与薯肉色度值间没有显著的相关性. 87 个品种间、76 个非紫肉色品种间、FC 群体间、DM 群体内品种间和 DM 群体间均表现为薯肉 BD 值与薯肉的明亮度 L^* 值存在负相关,

与 a^* 值存在正相关, 且绝大多数情况下有统计学意义. 在 76 个非紫肉品种间、FC1-FC9 群体间、DM 群体内品种间和 DM1-DM9 品种间(无紫薯), 薯肉 BD 值与 b^* , C 值正相关, 与 h^0 值负相关, 且绝大多数达到统计学意义; 在包含紫薯品种的情况下, b^* , h^0 值的正负性反转, 部分达到统计学意义.

表 10 供试材料薯肉 BD 值与薯肉色度值指标的相关系数

分析尺度	薯肉 BD 值				
	L^*	a^*	b^*	C	h^0
11 个紫肉品种间	0.186	0.086	0.207	0.002	0.398
FC10-FC11 群体间	-1.000**	1.000**	-1.000**	1.000**	-1.000**
76 个非紫肉品种间	-0.640**	0.647**	0.570**	0.630**	-0.614**
FC1-FC9 群体间	-0.890**	0.882**	0.775*	0.858**	-0.831**
87 个品种间	-0.903**	0.681**	-0.666**	0.175	0.873**
FC1-FC11 群体间	-0.981**	0.734*	-0.781**	0.111	0.936**
FC1 品种间	/	/	0.771*	0.764**	/
FC5 品种间	/	-0.942*	/	/	0.908*
FC11 品种间	0.883*	/	/	/	/
DM3 品种间(无紫薯)	-0.726*	0.714*	0.815*	0.794*	-0.730*
DM4 品种间(无紫薯)	-0.657	0.652	0.722*	0.746*	-0.501
DM5 品种间(无紫薯)	-0.641*	0.700**	0.287	0.467	-0.616*
DM6 品种间(无紫薯)	-0.652**	0.648**	0.309	0.420	-0.639*
DM7 品种间(无紫薯)	-0.712*	0.404	0.702*	0.700*	-0.389
DM1-DM9 品种间(无紫薯)	-0.692*	0.697*	0.839**	0.796*	-0.729*
DM3 品种间(含紫薯)	-0.936**	0.460	-0.538	0.149	0.884**
DM4 品种间(含紫薯)	-0.941**	0.551	-0.747*	-0.094	0.860**
DM5 品种间(含紫薯)	-0.787**	0.779**	-0.431	0.262	0.587*
DM6 品种间(含紫薯)	-0.967**	0.726**	-0.775**	0.113	0.937**
DM7 品种间(含紫薯)	-0.910**	0.886**	-0.845**	0.243	0.938**
DM8 品种间(含紫薯)	-0.991**	0.948**	-0.736**	0.344	0.992**
DM9 品种间(含紫薯)	-0.394	-0.219	0.703	0.703	0.013
DM1-DM9 品种间(含紫薯)	-0.901**	0.576	-0.424	0.298	0.833**

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

由于只有 5 个品种的皮层色泽稍低于薯肉色泽, 其余品种皮层色泽与薯肉色泽一致, 因此薯皮 BD 值表现出类似的相关性趋势.

2.4.2 甘薯块根 BD 值与 POD 活性、PPO 活性以及干物质质量分数之间的相关性分析

参考 2.4.1 方法进行多尺度下的相关性分析(数据略), FC3 群体内品种间薯肉 BD 值与薯肉 POD 活性显著正相关($r = 0.565$), DM5 群体内非紫肉甘薯品种间薯肉 BD 值与薯皮 PPO 活性显著负相关($r = -0.624$), DM1-DM9 群体间(无紫薯)薯皮 BD 值与薯皮 PPO 活性显著负相关($r = -0.674$), 其他情形下薯皮和薯肉 BD 值与两种酶的活性不相关. 76 个非紫肉甘薯品种间, 薯肉的 BD 值与块根的干物质质量分数显著负相关($r = -0.265$); FC1-FC9 群体之间, 薯皮和薯肉的 BD 值与干物质质量分数显著负相关($r = -0.809$ 和 $r = -0.785$); DM6 群体内品种间的 BD 值与干物质质量分数显著负相关($r = -0.562$), 其他情形下, BD 值与干物质质量分数无显著相关性, 包括 DM1-DM9 群体之间.

进一步分析干物质质量分数与色度值指标的相关性(数据略)表明, 76 个非紫肉甘薯品种间, FC1-FC9

群体之间的干物质质量分数与色度值 L^* , h^0 极显著正相关,与色度值 a^* , b^* 和 C 极显著负相关,87 个甘薯品种之间的干物质质量分数与色度值 a^* , b^* 和 C 显著或极显著负相关,FC1-FC11 群体之间的干物质质量分数与色度值 a^* 和 C 显著或极显著负相关。

控制干物质质量分数下的偏相关分析表明,薯肉 BD 值与色度值 L^* 显著或极显著负相关,与色度值 a^* 显著或极显著正相关,与 POD 和 PPO 活性的相关性没有规律性的变化。控制色度值指标 L^* , a^* 和 b^* 下的偏相关分析表明,76 个品种(系)间的薯肉 BD 值与薯皮 POD 活性和薯肉 PPO 活性正相关,DM3-DM9 群体之间的薯肉 BD 值与干物质质量分数显著正相关。薯皮 BD 值结果与薯肉类似。

3 讨论

甘薯是重要的粮食作物和食品加工原料之一,在块根收获、运输等过程中的机械创伤和加工操作时常导致褐变,降低了甘薯块根的鲜食销售率、加工利用率和产业效益,因此褐变是甘薯产业中一个不容忽视的问题,也是加工产品保鲜、保质面临的技术难点^[13]。

与前人研究不同,本文以育种中间材料为研究对象,用薯肉的 5 个色度指标值进行聚类分析,把 87 个供试材料分为白、淡黄、黄、橘黄、橘红、紫 6 个肉色大类和 11 个小类。从 FC1-FC9 的非紫肉群体中,它们的色度值变化规律明显,即薯肉色度值变化呈现 L^* 和 h^0 的数值依次逐渐降低,而 a^* , b^* 和 C 的数值依次逐渐增加的趋势;FC10-FC11 的紫肉品种群体 L^* 值在橘红肉色相应数值的基础上继续显著性降低, h^0 的数值极显著增加。薯肉色度值的这种规律性变化与非紫肉甘薯块根中胡萝卜素和紫肉甘薯块根中花青素的合成与积累逐渐加强有关^[14-15]。

双相关分析表明,87 个品种(系)间、76 个非紫肉色品种(系)间、FC 群体间、DM 群体内品种间和 DM 群体间均表现为薯皮和薯肉 BD 值与薯肉的 L^* 值存在负相关,与 a^* 值存在正相关,且大多数情况下达到统计学意义;与干物质质量分数、POD 和 PPO 活性只有少数情况下存在相关性。进一步偏相关分析表明,薯肉褐变度(BD)值多数情况下仍然与明亮度 L^* 值存在显著负相关,与 a^* 存在显著正相关。BD 值与 L^* 和 a^* 的显著相关性表明,甘薯块根薯皮和薯肉 BD 值主要受块根胡萝卜素、花青素积累的影响,色素积累越强,褐变强度越大,这可能与胡萝卜素、花青素接触空气中氧容易氧化变色有关^[16-17]。在色度值相同情况下褐变度再受干物质质量分数、POD 和 PPO 活性的次要影响。

因此类似板栗^[18]、砂梨^[19]育种,在甘薯新品种选育过程中,可利用色差计测定 L^* , a^* 值对品种筛选提供有效支撑,如可以利用 L^* , a^* 值间接选择抗褐变甘薯品种。

本文测定结果和分析表明,薯皮 POD 活性和 PPO 活性显著高于薯肉中相应酶的活性,薯皮褐变度(BD)值也显著高于薯肉 BD 值,这与钟子毓等^[20]发现薯皮与薯肉褐变的呈现有显著差异的结论一致。这是由于块根膨大的主体薯肉薄壁细胞较多,没有薯皮细胞致密(褐变酶与底物区域化隔离更近),水分质量分数相对高^[21],因此,在甘薯薯条、薯干等非淀粉食品加工过程中,需要去掉薯皮,可从薯皮中有效提取 POD 和 PPO,避免资源浪费和避免褐变造成的污染^[22-23]。

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] 王佳佳,杨春贤,曾令江,等. 高淀粉甘薯新品种“渝薯 1 号”的选育研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(7): 30-35.
- [3] LIM T K. *Ipomoea batatas* [M] //LIM T K. Edible Medical and Non-Medical Plants; Volume10, Modified Stems, Roots, Bulbs. Berlin: Springer, 2016.
- [4] SANCHÍS E, GONZÁLEZ S, GHIDELLI C, et al. Browning Inhibition and Microbial Control in Fresh-Cut Persimmon (*Diospyros Kaki* Thunb. Cv. Rojo Brillante) by Apple Pectin-Based Edible Coatings [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 186-193.

- [5] 郁志芳, 夏志华, 陆兆新. 鲜切甘薯酶促褐变机理的研究 [J]. 食品科学, 2005, 26(5): 54-59.
- [6] HE Q, LUO Y G. Enzymatic Browning and Its Control in Fresh-Cut Produce [J]. Stewart Postharvest Review, 2007, 3(6): 1-7.
- [7] 王彬, 陈敏敏, 朱海生, 等. 果蔬酶促褐变研究进展 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 189-194.
- [8] FUKUOKA N, MIYATA M, HAMADA T, et al. Histochemical Observations and Gene Expression Changes Related to Internal Browning in Tuberous Roots of Sweet Potato (*Ipomea batatas*) [J]. Plant Science, 2018, 274: 476-484.
- [9] 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.
- [10] 冯程程, 于筠, 王春玲. 不同贮藏温度下鲜切紫甘薯褐变相关因素研究 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 244-249, 253.
- [11] 刘硕, 王礼群, 张欣怡, 等. 抗坏血酸钙和 ϵ -聚赖氨酸对鲜切甘薯保鲜护色效果的影响 [J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 132-136, 142.
- [12] 汤绍虎, 罗充. 植物生理学实验教程 [M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2012.
- [13] 高海生, 刘绍军, 朱丽清. 甘薯加工中的褐变因素及其控制措施 [J]. 食品科学, 2011, 32(S1): 33-35.
- [14] AMENY M A, WILSON P W. Relationship between Hunter Color Values and B-Carotene Contents in White-Fleshed African Sweetpotatoes (*Ipomoea batatas* Lam) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 73(3): 301-306.
- [15] AMOANIMAA-DEDE H, SU C T, YEBOAH A, et al. Flesh Color Diversity of Sweet Potato: an Overview of the Composition, Functions, Biosynthesis, and Gene Regulation of the Major Pigments [J]. Phyton, 2020, 89(4): 805-833.
- [16] 张慙, 廖红梅. 果蔬食品加工贮藏过程中易变色素的降解及调控机理研究与展望 [J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 258-267.
- [17] 刘常园, 汤静, 赵立艳. 花青素的稳定性与功能研究进展 [J]. 食品与营养科学, 2018, 7(1): 53-63.
- [18] 张树航, 李颖, 王广鹏, 等. 利用精密色差仪测定板栗果实褐变的方法研究 [J]. 河北农业科学, 2016, 20(3): 101-103.
- [19] 范净, 陈启亮, 杨晓平, 等. 色差仪在砂梨果肉褐变分析上的应用 [J]. 农业与技术, 2017, 37(18): 38.
- [20] 钟子毓, 林力卓, 马晓鹏, 等. 不同甘薯品种薯皮肉酶促褐变的差异 [J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 47-51.
- [21] 张庆会, 徐步东. 试论甘薯块根的生长机理 [J]. 生物学通报, 2002, 37(8): 22-23.
- [22] 曹秋萍, 李扬帆, 杨林玲, 等. 论多酚氧化酶的开发及应用前景 [J]. 北京农业, 2015(14): 17.
- [23] 孙立水, 高强. 过氧化物酶的应用研究进展 [J]. 化工技术与开发, 2006, 35(12): 13-16, 28.

责任编辑 周仁惠