

文章编号: 1674-7054(2021)04-0466-07



甘薯叶片的抗氧化活性和相关成分比较

石 婕¹, 符雪影¹, 吴 强¹, 梁清干², 朱国鹏², 祝志欣¹

(1. 海南大学 生命科学与药学院, 海口 570228; 2. 海南大学 园艺学院/
海南省热带园艺作物品质调控重点实验室, 海口 570228)

摘 要: 为了选育保健型菜用甘薯品种, 以海南地区栽种的 10 个甘薯品种为材料, 对叶片中 3 种色素(花青素、叶绿素、类胡萝卜素)、总酚和总黄酮含量进行测量, 通过分析各指标与代表抗氧化性的 ABTS(2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)、DPPH(2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl, 2,2'-二苯基-2-三硝基苯肼) 自由基清除能力的关联性, 综合分析甘薯叶片的抗氧化成分及抗氧化活性。结果表明, 不同甘薯品种叶片的抗氧化活性与总黄酮、花青素含量呈极显著正相关($P < 0.01$), 与叶绿素含量呈显著正相关($P < 0.05$), 与总酚含量呈正相关但未达到显著相关水平($P > 0.05$)。甘薯‘福薯 7-6’的叶绿素和类胡萝卜素含量较高, 但总酚、总黄酮和花青素含量低, 抗氧化活性最低; ‘渝 15’和‘徐紫菜 8’叶片的总酚、总黄酮和花青素显著高于其他 8 个品种, 抗氧化活性最高。在选育保健型菜用甘薯时, 可根据叶片颜色初步判断其抗氧化性能, 降低育种成本。

关键词: 甘薯叶; 抗氧化性; 花青素; 总酚; 总黄酮; 菜用甘薯品种

中图分类号: S 531 文献标志码: A

引用格式: 石婕, 符雪影, 吴强, 等. 甘薯叶片的抗氧化活性和相关成分比较 [J]. 热带生物学报, 2021, 12(4): 466-472. DOI: [10.15886/j.cnki.rds wxb.2021.04.009](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.2021.04.009)

甘薯 (*Ipomoea batatas*) 是旋花科 (Convolvulaceae) 甘薯属 (*Ipomoea*) 草质藤本植物, 又名地瓜、红薯或红苕。甘薯耐贫瘠、易栽培, 其地下块根是亚洲地区重要的粮食和经济作物, 具有高产、稳产、营养价值高等优点^[1]; 其叶可以作为蔬菜, 含丰富的 Ca、Mg、Na、K、Fe、Cu、Zn 等矿物质^[2] 和可溶性纤维、维生素、烟酸、生物素等^[3], 营养价值较高。与红甘蓝、葡萄和紫色玉米等果蔬相比, 甘薯叶提取物的抗氧化活性较强^[4], 是世界卫生组织推荐的保健蔬菜^[5]。摄入抗氧化性食品不仅可帮助人体清除体内的自由基, 提高免疫能力, 降低人体患血脂和心血管疾病的风险, 还有抑制肿瘤细胞增生、预防慢性疾病的功效^[6-7]。甘薯叶营养丰富, 已被报道的主要抗氧化成分包括酚类和维生素 C 等^[8], 其中酚类是甘薯叶具有优秀抗氧化性的重要原因^[9-10], 这与大多数蔬菜不同。席利莎^[9] 对 40 种甘薯茎叶进行抗氧化活性和多种营养素含量间相关性分析, 结果表明, 甘薯茎叶的抗氧化活性与酚类含量间的相关系数最高 ($R = 0.7589$, $P < 0.00001$)。邱俊凯等^[10] 对 58 个不同品种甘薯叶中的粗蛋白、粗脂肪、膳食纤维、维生素、多酚、黄酮类物质进行含量及抗氧化活性相关分析, 结果表明, 甘薯茎叶中主要的抗氧化活性物质为多酚类。植物酚类包含酚酸、黄酮和花青素等, 其中花青素是肉眼可见的一类色素, 在叶片中表现为红紫色, 被认为是“看得见的抗氧化性”^[11]。马小磊等^[12] 研究表明红紫色甘薯叶具有更高的抗氧化能力。叶绿素和类胡萝卜素这 2 种主要色素与抗氧化性的相关性也被报道: 张兵等^[13] 在猕猴桃中鉴定到的 5 种叶绿素都具有一定的抗氧化活性; 王紫璇等^[14] 文献调研发现, 类胡萝卜素可抑制、消除体内的游离基, 具有减缓衰老和提

收稿日期: 2021-04-23

修回日期: 2021-06-13

基金项目: 海南省重点研发项目 (ZDYF2019030, ZDYF2020226); 国家自然科学基金地区科学基金项目 (31660074)

第一作者: 石婕 (1994-), 女, 海南大学生命科学与药学院 2018 级硕士研究生. E-mail: 820298211@qq.com

通信作者: 祝志欣 (1986-), 女, 副教授. 研究方向: 甘薯花青素分子生物学. E-mail: zhxzhu@126.com

高抵抗力等效能,但此3类色素与蔬菜抗氧化性的综合关系鲜有研究。甘薯叶是开发优质保健蔬菜的良好材料,目前商品化的菜用甘薯基本为全绿表型。笔者选取海南地区栽种的10个甘薯品种的叶片为材料,采用比色法,对其花青素、叶绿素、类胡萝卜素、总酚和总黄酮含量进行测定,结合ABTS(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)和DPPH(2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl, 2,2'-二苯基-2-三硝基苯肼)自由基清除能力所表征的抗氧化活性,综合分析不同品种甘薯叶片中各类物质与抗氧化活性的相关性,旨在为海南省保健型菜用甘薯的品种选育工作提供理论依据,并为甘薯叶的综合开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料 实验材料包含海南地区栽种的7个菜用型甘薯和3个块根利用型甘薯(表1),其中‘福薯7-6’是菜用甘薯的代表品种,叶片全绿;‘徐紫菜8’、‘渝15’、‘宁紫薯1’和‘川山紫’叶片带有不同程度的紫红色表型,其中‘徐紫菜8’为本研究中唯一一种叶片明显带紫色的菜用甘薯品种。将所有材料统一种植于海南大学海甸校区农科基地(东经110°19'8",北纬20°3'39"),常规水肥管理。各甘薯品种扦插1.5~2个月,收集藤蔓顶端约12 cm的茎段(5~8片叶片),3个茎段上所有叶片剪碎混合后作为一个生物学重复,进行后续各生理指标的测量。每个生理指标测量均进行3个生物学重复。

表1 海南地区10个甘薯品种的基本特性

Tab. 1 Basic characteristics of the 10 sweetpotato varieties in Hainan

品种 Varieties	来源地 Origin	类型 Uses	株型 Plant shape	叶片绒毛 Leaf hair	叶型 Leaf shape	组织颜色 Tissue color				
						顶叶色 Top leaf	叶色 Leaf	叶缘色 Leaf edge	叶脉色 Leaf vein	茎色 Stem
‘福薯7-6’	福建	菜用	直立	无	心形	绿	绿	绿	浅绿	浅绿
‘海大7798’	海南澄迈	菜用	直立	无	肾形	绿	绿	绿	浅绿	绿
‘台农71’	福建	菜用	半直立	少	心形	绿	绿	绿	绿	绿
‘薯绿2号’	海南陵水	菜用	直立	少	缺刻	绿	绿	绿	绿	绿
‘湘菜薯3号’	湖南	菜用	半直立	无	心形	绿	绿	绿	浅绿	绿
‘广薯5号’	广东	菜用	匍匐	多	三角形	浅绿	绿	绿	绿	绿
‘徐紫菜8’	江苏徐州	菜用	半直立	多	心形	绿	带紫晕	紫红	紫	紫
‘渝15’	海南陵水	淀粉	直立	少	心形	浅紫绿	带紫晕	紫红	紫	紫
‘宁紫薯1’	江苏	淀粉紫薯	直立	少	心形	浅绿	绿	浅紫转绿	紫	紫绿
‘川山紫’	日本川崎	食用	直立	无	三角形	紫	由紫变绿	由紫转绿	绿	绿

注:顶叶表示第一片展开的叶片,叶色表示顶叶往下其他叶片的颜色。

Note: The top leaf indicates the first uncurled leaf on the top of the vine, and leaf color indicates the color of other leaves down along the vine.

1.2 方法

1.2.1 徒手切片 参考WANG等^[15]方法,对甘薯的叶肉和叶脉进行徒手切片,并立刻进行临时装片和显微观察,以防止色素的流失。将显微镜调至合适的视野和倍数后进行拍照。

1.2.2 花青素含量的测定 根据LUO等^[16]和SUN等^[17]的方法,取1 g叶片材料于10 mL 1%盐酸—甲醇(V/V)中进行研磨提取,适当稀释过滤液,分别在525、657 nm处测吸光度,计算花青素含量。

$$\text{花青素含量} = (A_{525} - 0.25 \times A_{657}) \times V \times DR \times M / (\varepsilon \times m),$$

式中:花青素含量单位为(mg·g⁻¹);A₅₂₅和A₆₅₇分别为样品在525、657 nm处的吸光度,其中A₅₂₅为花色苷的吸收主峰,0.25×A₆₅₇为对叶片中额外提取出的少量叶绿素的底消除;V为提取液总体积(mL);

DR (dilution rate)为稀释倍数; M 为 Cy-3-Glu(矢车菊色素-3-葡萄糖苷)的相对分子质量(449); ϵ 为 Cy-3-Glu 的消光系数(29 600); m 为样品鲜质量(g)。组织样品均以鲜质量(fresh weight, FW)表示;每个样品测量都进行 3 次生物学重复。

1.2.3 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定 参照古丽江等^[18]和 DENG 等^[19]实验方法,取 1 g 叶片材料,用 10 mL 95% 乙醇进行研磨提取,适当稀释过滤液,在 665、649、470 nm 下测吸光度,计算类胡萝卜素和叶绿素含量,其中叶绿素含量为叶绿素 a 和叶绿素 b 两者含量之和。组织样品均以鲜质量(fresh weight, FW)表示;实验进行 3 次生物学重复。

1.2.4 总酚和总黄酮含量的测定 参照刘子金^[20]的方法,取 1 g 叶片材料于 10 mL 75% 乙醇溶液中研磨。4 ℃, 10 000 r·min⁻¹ 下离心 1 min 后取上清液并过滤,用 75% 乙醇溶液补至 10 mL,此时样品提取液浓度为 100 g·L⁻¹。总酚的测定,参照文献^[20]采用福林酚法,以没食子酸(Gallic acid, GAE)制作标准曲线并得到回归方程,对各样品在 760 nm 下测吸光度,代入回归方程计算总酚浓度。结果以每克鲜质量样品所含的没食子酸当量(mg·g⁻¹)表示,实验进行 3 次生物学重复。总黄酮的测定包括黄酮、异黄酮、黄酮醇、二氢黄酮醇和双黄酮物质的总含量,但不包含花青素的含量。参照文献^[20]采用氯化铝显色法,以芦丁(Rutin)制作标准曲线并得到回归方程,在 508 nm 波长下测吸光度,代入回归方程计算各样品中的总黄酮含量。结果以每克鲜质量样品中所含的芦丁当量(mg·g⁻¹)表示,实验进行 3 次生物学重复。

1.2.5 抗氧化测定 通过测定 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力来估算各甘薯品种叶片的抗氧化性。参照刘子金^[20]的方法进行样品的提取和测量,提取步骤与总酚和总黄酮相同,样品测量分别在 734、517 nm 处进行,结果以清除率表示。

$$\text{清除率}/\% = [(A_0 - A_1)/A_0]100\%,$$

式中, A_0 表示空白对照管的吸光值, A_1 表示加入样品后的吸光值。

ABTS 和 DPPH 自由基清除能力最终结果采用 IC_{50} 值(concentration for 50% inhibition;即体系中自由基清除率达到 50% 时的样品浓度)进行定量计算。 IC_{50} 值越小,代表其抗氧化能力越高,所有测定均进行 3 次生物学重复。

1.3 数据处理 所有数据以 3 个生物重复的平均值和标准误差(SE)表示。采用 SPSS 23 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯检验(Duncan's test), $P < 0.05$ 为差异显著;采用 Pearson 双向分析得到叶片营养物质与抗氧化能力的相关系数(R);采用 Excel 2010 绘图。

2 结果与分析

2.1 甘薯叶色素的组织定位和含量测定 叶片色素不仅与植株长势相关,很可能也与植株抗氧化性直接相关。本研究甘薯品种的叶片切片结果如图 1 所示,包括叶片全绿的‘福薯 7-6’、叶片带红色的‘川山紫’、‘徐紫菜 8’和‘渝 15’。‘福薯 7-6’叶片上下表皮透明,叶肉为绿色,未观察到花青素的积累(图 1-A)。‘川山紫’幼叶为红色,成熟叶为绿色;其幼叶切片图显示花青素积累于叶片和叶脉的上下表皮及叶肉栅栏组织的上层细胞,而海绵组织为全绿(图 1-B);‘川山紫’成熟叶的切片图未发现花青素积累(图 1-C)。‘徐紫菜 8’和‘渝 15’叶片呈带紫晕的表型,切片图显示它们叶片和叶脉的上下表皮积累花青素,而叶肉为绿色,与紫晕表型对应;与‘徐紫菜 8’相比较,‘渝 15’叶肉部分绿色更深(图 1-D, E)。

各甘薯品种叶片的花青素、叶绿素和类胡萝卜素含量测定结果如图 2 所示。花青素含量(图 2-A):叶片带红色的 4 个甘薯品种显著高于其他叶片全绿的品种,‘徐紫菜 8’和‘渝 15’花青素含量最高,其次为‘宁紫薯 1’和‘川山紫’。叶绿素含量(图 2-B):‘渝 15’最高,其次为‘福薯 7-6’和‘广薯 5 号’,‘海大 7798’和‘湘菜薯 3 号’的叶绿素含量最低。类胡萝卜素含量:各甘薯品种差异不大(图 2-C),范围值为 0.124 ~ 0.211 mg·g⁻¹,平均含量为 0.161 mg·g⁻¹,各品种间的相对数据与叶绿素含量趋势表现一致。

综合叶切片和色素测定结果,叶片红色表型与花青素含量直接相关,绿色叶片基本没有花青素积累。‘渝 15’为块根利用型甘薯,其叶片的花青素、叶绿素和类胡萝卜素水平均较高;菜用甘薯中的‘福薯

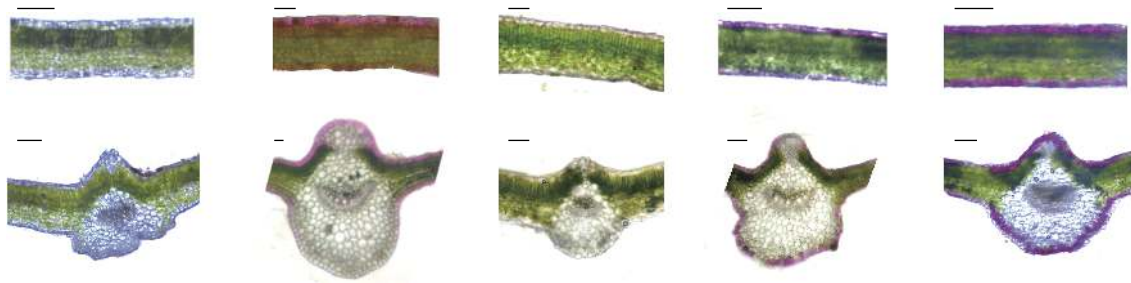


图 1 甘薯品种叶切片图

A. ‘福薯 7-6’; B. ‘川山紫’幼叶; C. ‘川山紫’成熟叶; D、E. ‘徐紫菜 8’和‘渝 15’的叶片及叶脉切片。上方为叶片切片图, 下方为叶脉切片图。图中各标尺均代表 100 μm 长度。

Fig. 1 Cross sections of representative leaves of the sweetpotato varieties

A: Sweetpotato ‘Fushu 7-6’; B: Young leaf of ‘Chuansanzi’; C: Mature leaf of ‘Chuansanzi’; D, E: Leaves and leaf veins of ‘Xuzicai 8’ and ‘Yu 15’.

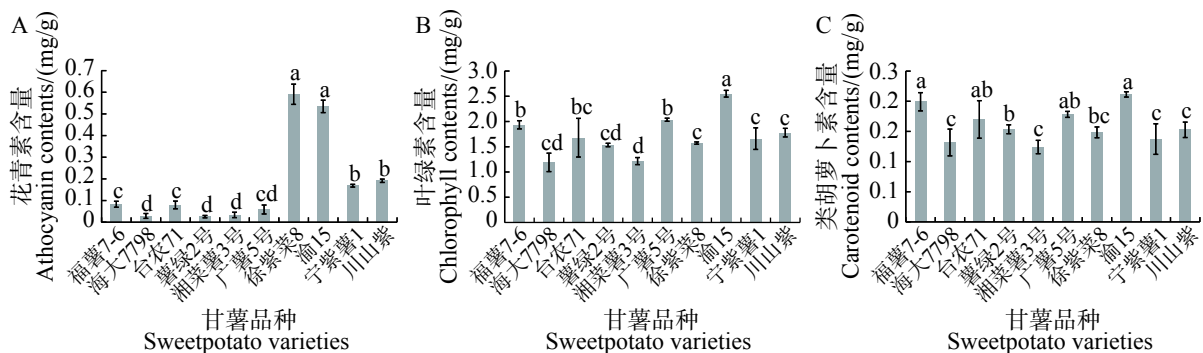


图 2 不同甘薯品种叶片的色素含量

A. 花青素含量; B. 叶绿素含量; C. 类胡萝卜素含量。

Fig. 2 Pigment contents in the leaves of the 10 sweetpotato varieties

A: Anthocyanin content; B: Chlorophyll content; C: Carotenoids content.

7-6’和‘广薯 5 号’含有较高的叶绿素和类胡萝卜素, 而‘徐紫菜 8’含有较高的花青素。

2.2 总酚和总黄酮含量比较 总酚含量(图 3-A): ‘福薯 7-6’(4.61 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和‘川山紫’(5.78 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)的总酚显著低于其他品种; 其余 8 个品种总酚含量数值接近(6.88 ~ 7.83 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), ‘渝 15’总酚含量最高(7.83 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。总黄酮含量(图 3-B): 各品种的数值差异幅度较大, ‘徐紫菜 8’和‘渝 15’的总黄酮含量显著高于其他 8 个品种; ‘川山紫’和‘福薯 7-6’总黄酮含量最低, ‘福薯 7-6’总黄酮含量(11.84 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)约为

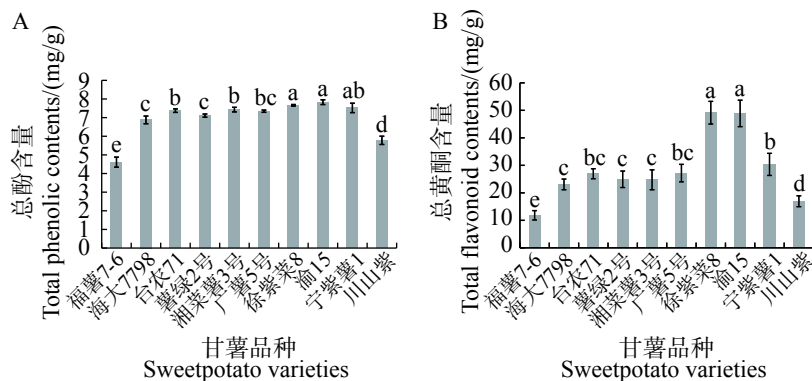


图 3 不同甘薯品种叶片的总酚和总黄酮含量

A. 总酚含量; B. 总黄酮含量。

Fig. 3 Contents of total phenolics and total flavonoids in the leaves of the 10 sweetpotato varieties

A: Total phenolics content; B: Total flavonoids content

‘徐紫菜 8’(49.14 mg·g⁻¹)的四分之一。综合各品种甘薯叶片总酚和总黄酮的数据,‘渝 15’和‘徐紫菜 8’的总酚和总黄酮较高,而‘川山紫’和‘福薯 7-6’的总酚和总黄酮显著低于其他 8 个甘薯品种。

2.3 抗氧化能力的比较 各品种甘薯叶片抗氧化性的定量以 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力的 IC_{50} 值显示, IC_{50} 值越小,代表抗氧化能力越高。

表 2 结果表明,在 ABTS 自由基清除能力测定中,抗氧化能力最强的是‘渝 15’, $IC_{50} = (0.78 \pm 0.11) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 其次为‘徐紫菜 8’; 最低为‘福薯 7-6’, $IC_{50} = (8.69 \pm 1.09) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 其余 7 个品种 ABTS 的 IC_{50} 数值接近。各甘薯品种 DPPH 的 IC_{50} 数值变化幅度较大,‘渝 15’和‘徐紫菜 8’DPPH 的 IC_{50} 数值最低,清除率显著高于其他 8 个品种。‘宁紫薯 1’、‘湘菜薯 3 号’及‘台农 71’略高于‘广薯 5 号’和‘薯绿 2 号’。‘福薯 7-6’的 DPPH 清除率力较低,但清除力最低的甘薯品种为‘川山紫’, $IC_{50} = (24.88 \pm 1.18) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综合比较 ABTS 与 DPPH 自由基清除能力,‘渝 15’和‘徐紫菜 8’抗氧化性较强,‘宁紫薯 1’、‘湘菜薯 3 号’和‘台农 71’的抗氧化性表现也不错,而‘福薯 7-6’和‘川山紫’的抗氧化能力最差。

2.4 抗氧化性与色素、总酚和总黄酮含量相关度分析 各品种甘薯叶片的抗氧化性与 3 种色素、总酚、总黄酮含量相关性如表 3 所示。虽然 ABTS 与 DPPH 代表的抗氧化性指标稍有差异,但它们的数据呈极显著正相关($P < 0.01$)。ABTS 和 DPPH 与总黄酮和花青素呈极显著正相关($P < 0.01$); 与总酚呈正相关,但不显著($P > 0.05$),可能因总酚含量的数值在各品种差别不大导致。总黄酮与总酚、花青素呈显著正相关($P < 0.05$),但总酚和花青素之间关联度不大。叶绿素和类胡萝卜素是植物进行光合作用的重要物质,而花青素为额外的次生代谢色素。3 种色素中,叶绿素与类胡萝卜素含量呈极显著正相关,与花青素关联度不大,表明叶绿素和类胡萝卜素作为光合复合物成员比例恒定^[21],而与花青素呈相互独立的关系。综合来说,甘薯叶抗氧化性与黄酮和花青素相关性最高,与叶绿素也有较高的相关度,而与总酚的相关度未达到显著。

表 2 不同甘薯叶片抗氧化能力

Tab. 2 Antioxidant activities of the leaves of the 10 sweet-potato varieties

品种 Varieties	ABTS半清除浓度 IC_{50} for ABTS/(g·L ⁻¹)	DPPH半清除浓度 IC_{50} for DPPH/(g·L ⁻¹)
福薯7-6	8.69±1.09e	14.58±0.60cd
海大7798	4.11±1.50cd	18.91±2.09d
台农71	3.08±1.20bc	8.02±0.76b
薯绿2号	3.85±0.15cd	11.86±0.19c
湘菜薯3号	3.00±0.16c	6.24±0.90b
广薯5号	3.13±0.07c	12.96±0.78c
渝15	0.78±0.11a	0.81±0.50a
徐紫菜8	1.74±0.29b	1.10±0.99a
宁紫薯1	2.98±0.48c	5.52±0.56b
川山紫	4.33±1.13cd	24.88±2.38de

注: IC_{50} 值越小,代表抗氧化能力越高。

Note: Smaller values of IC_{50} indicate higher antioxidant activities.

表 3 不同甘薯叶片抗氧化能力与各指标的相关性

Tab. 3 Correlation between antioxidant activities and various indexes in the leaves of the 10 sweetpotato varieties

	ABTS	DPPH	总酚 Total phenolics	总黄酮 Total flavonoids	花青素 Anthocyanins	叶绿素 Chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoids
ABTS	1						
DPPH	0.927**	1					
总酚	0.548	0.472	1				
总黄酮	0.838**	0.908**	0.761*	1			
花青素	0.776**	0.931**	0.337	0.849**	1		
叶绿素	0.636*	0.532	-0.03	0.335	0.481	1	
类胡萝卜素	0.468	0.405	-0.247	0.151	0.316	0.904**	1

注: * 表示在 0.05 级别水平(双尾)相关性显著; ** 表示在 0.01 水平(双尾)相关性极显著。相关性分析中 ABTS 与 DPPH 数值采用其 IC_{50} 的倒数。

Note: * Significant correlation at the 0.05 level (two-tailed); ** Highly significant correlation at the 0.01 level (two-tailed). Values of ABTS and DPPH used in correlation analysis were the reciprocal of IC_{50} .

3 讨 论

目前国内甘薯茎叶的利用程度普遍较低,除少部分用作蔬菜和饲料外,大部分被随意丢弃,造成资源浪费^[22]。海南省地处热带季风气候区域,气候复杂多样,历来是台风、干旱和洪涝等农业自然灾害频发地区。甘薯耐贫瘠、易栽培,甘薯叶顶尖部分可反复采摘,当灾害发生蔬菜供应不足时可作有效补充。

近年来,随着人们保健理念的增强以及菜用甘薯的开发,甘薯叶越来越受消费者喜爱^[5]。目前商品化的菜用甘薯基本为全绿表型,关于其活性成分报道主要集中在酚类中无色的总酚和黄酮。本实验除了测定总酚和总黄酮的含量外,还加入了甘薯叶色相关的3种色素(花青素、叶绿素和类胡萝卜素)的直接切片观察及含量测定,并比较分析了以上各类物质与抗氧化活性的相关性。叶片切片结果显示,叶片表型与其色素分布基本吻合:全绿叶片无花青素积累;‘徐紫菜8’和‘渝15’紫晕表型对应表皮细胞中花青素的积累;‘川山紫’幼叶红叶表型对应栅栏组织中额外的花青素分布。以上结果与马小磊等^[12]对‘徐紫薯3’的茎叶切片结果一致。本研究中,甘薯叶 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力与总黄酮和花青素含量呈显著正相关($P < 0.01$),与黄酮和花青素的功能相符。靳艳玲等^[23]对不同甘薯品种的叶、藤、皮、肉4个部位抗氧化活性分析发现,甘薯叶中的黄酮类化合物对 DPPH 自由基清除能力较强;王永徐^[22]研究表明,‘台湾红’甘薯叶花青素含量较高,抗氧化活性也较强,与本研究结果相符。本研究中,甘薯叶抗氧化活性与总酚含量虽呈正相关,但未达到显著($P > 0.05$),此结果与前人报道的多酚是甘薯叶最关键的抗氧化物质的结论不太吻合^[9-10]。对本研究的数据分析发现,各甘薯品种总酚含量在数值上差异不大,很可能导致了总酚含量与抗氧化活性在相关性检测中并未达到显著。3种色素中,抗氧化活性与花青素含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与叶绿素含量呈显著正相关($P < 0.05$),而与类胡萝卜素含量相关性未达到显著。以上结果反映了甘薯叶中的叶绿素和类胡萝卜素主要以光合色素形式存在,行使光合作用的功能^[21],与猕猴桃果实积累的叶绿素意义存在差异^[13]。本研究中,不同甘薯品种叶片的叶绿素、花青素、总酚和总黄酮等成分的含量差异反映了基因型所导致的遗传性状差异,而各类物质含量的相关性则反映了代谢途径的关联性^[11-12]:如花青素和总黄酮都隶属于类黄酮,合成途径有较多重叠,其含量在本研究呈现高度相关($P < 0.01$);而总酚成分的合成主要依赖于苯丙烷途径,此途径位于类黄酮途径更上游,属于更基本的代谢途径,总酚含量在各品种间的变异也较小。

甘薯叶是开发优质保健蔬菜的良好材料。本研究结果表明,各甘薯品种叶片中酚类含量差异较小,而其总黄酮和花青素含量是抗氧化差异的主要因素。花青素作为“看得见的抗氧化性”,与甘薯叶的抗氧化活性极显著相关,表明在进行保健型菜用甘薯选育时,可直接根据叶片颜色对其抗氧化性能进行初步的直观判断,可以节约人力物力资源,降低育种工作成本。

参考文献:

- [1] 马代夫,李强,曹清河,等.中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J].江苏农业学报,2012,28(5):969-73.
- [2] ISHIDA H, SUZUNO H, SUGIYAMA N, et al. Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweetpotatoes (*Ipomoea batatas* Poir) [J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(3): 359-367.
- [3] SUN H, MU T, XI L, et al. Sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) leaves as nutritional and functional foods [J]. *Food Chemistry*, 2014, 156(8): 380-389.
- [4] THU N N, SAKURAI C, UTO H, et al. The polyphenol content and antioxidant activities of the main edible vegetables in northern Vietnam [J]. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 2004, 50(3): 203-210.
- [5] 曹清河,刘义峰,李强,等.菜用甘薯国内外研究现状及展望[J].*中国蔬菜*, 2007(10): 41-43.
- [6] 李磊,王岳飞,梁燕,等.天然抗氧化物质的保健功能及抗氧化活性研究进展[J].*茶叶*, 2008(2): 70-74.
- [7] 吕淑河,林聪,徐平声.引种巴西甘薯叶抗肿瘤活性部位的筛选[J].*中南大学学报(医学版)*, 2015, 40(5): 499-503.
- [8] JANG Y, KOH E. Antioxidant content and activity in leaves and petioles of six sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) and antioxidant properties of blanched leaves [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(2): 337-345.
- [9] 席利莎.甘薯茎叶营养成分及其多酚抗氧化活性的研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [10] 邱俊凯,隋伟策,木泰华,等.58个不同品种甘薯茎叶营养与功能成分的研究[J].*核农学报*, 2021, 35(4): 911-922.
- [11] 祝志欣,鲁迎青.花青素代谢途径与植物颜色变异[J].*植物学报*, 2016, 51(1): 107-119.
- [12] 马小磊,高霞莉,叶雯青,等.甘薯茎叶中花青素的定位及含量测定[J].*植物学研究*, 2017, 6(2): 31-38.

- [13] 张兵, 雷生姣, 张磊, 等. 宜昌绿肉猕猴桃果肉中叶绿素的结构鉴定及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 31 – 35.
- [14] 王紫璇, 李佳佳, 于旭东, 等. 高等植物类胡萝卜素生物合成研究进展[J]. 分子植物育种, 2021, 19(8): 2627 – 2637.
- [15] WANG W H, ZHAN D S, YU S C, et al. Mapping the BrPur gene for purple leaf color on linkage group A03 of *Brassica rapa* [J]. *Euphytica*, 2014, 199: 293 – 302.
- [16] LUO J, DUAN J, DA N H, et al. Transcriptomic analysis reveals transcription factors related to leaf anthocyanin biosynthesis in *Paeonia qiui* [J]. *Molecules*, 2017, 22(12): e2186.
- [17] SUN Y T, Li M, MITRA S, et al. Comparative phytochemical profiles and antioxidant enzyme activity analyses of the southern highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) at different developmental stages [J]. *Molecules*, 2018, 23(9): e2209.
- [18] 古丽江·许库尔汗, 张东亚, 陈同森, 等. 2种花楸秋叶变色期叶片主要成分含量的动态变化[J]. 西南农业学报, 2016, 29(5): 1068 – 1074.
- [19] DENG J L, WU D N, SHI J, et al. Multiple MYB activators and repressors collaboratively regulate the juvenile red fading in leaves of sweetpotatoes [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: e941.
- [20] 刘子金. 异藤黄酮对 HepG2 细胞氧化应激损伤的保护作用研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [21] 姜立, 朱长甫, 于婷婷, 等. 类胡萝卜素的研究进展[J]. 生物化工, 2020, 6(6): 136 – 139.
- [22] 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, 2018.
- [23] 靳艳玲, 谭力, 杨林, 等. 不同品种甘薯不同部位的抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 51 – 58.

Antioxidant Activities of Sweetpotato Leaves and Comparison of Their Related Components

SHI Jie¹, FU Xueying¹, WU Qiang¹, LIANG Qinggan², ZHU Guopeng², ZHU Zhixin¹

(1. School of Life and Pharmaceutical Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. College of Horticulture, Hainan University/ Hainan Key Laboratory for Quality Regulation of Tropical Horticultural Crops, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: In order to select sweetpotato varieties with healthy leaves as vegetables in Hainan Province, 10 sweetpotato varieties were comprehensively evaluated in terms of leaf antioxidant activities. The leaf contents of three pigments (chlorophylls, carotenoids, and anthocyanins), total phenolics and total flavonoids were determined, and the ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)) and DPPH (2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical scavenging abilities, which directly represent antioxidant activities, were also detected in the leaves. The results showed that the leaf antioxidant activities in all the sweetpotato varieties were positively correlated with the leaf contents of total flavonoids ($P < 0.01$), anthocyanins ($P < 0.01$), chlorophylls ($P < 0.05$), and total phenolics ($P > 0.05$). The vegetable sweetpotato variety 'Fushu 7-6' was higher in the contents of chlorophylls and carotenoids, but lower in the contents of total flavonoids, total phenolics and anthocyanins, and hence was the lowest in the antioxidant activity among the 10 sweetpotato varieties. Sweetpotato varieties 'Yu 15' and 'Xuzicai 8' had significantly higher leaf contents of total phenols, total flavonoids and anthocyanins than the other 8 sweetpotato varieties, and were the highest in antioxidant activity. The red color of the leaves of sweetpotato varieties indicated higher antioxidant activity in the leaves, based on which sweetpotato varieties with healthy leaves as vegetables can be selected to reduce the breeding cost.

Keywords: sweetpotato leaves; antioxidant activity; anthocyanins; total phenolics; total flavonoids; sweetpotato variety with leaves as vegetables

(责任编辑:段洪浪 责任编辑:钟云芳)