

王 琼,吴晓杰,郭华春,等.滇紫甘薯新品种抗氧化物质含量及活性测定[J].江苏农业科学,2023,51(17):179-185.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.025

滇紫甘薯新品种抗氧化物质含量及活性测定

王 琼,吴晓杰,郭华春,李 俊,肖继坪

(云南农业大学农学与生物技术学院,云南昆明 650201)

摘要:紫甘薯具有丰富的酚类物质,因此有抗氧化活性,为探明新选育的滇紫甘薯抗氧化组分和活性,为滇紫甘薯系列保健食品的开发提供理论基础。采用紫外分光光度计法测定了云南农业大学选育的滇紫甘薯新品种的花色苷、总黄酮、绿原酸、总酚、 β -胡萝卜素等物质的含量及抗氧化活性。不同滇紫甘薯品种的花色苷含量和总还原力均高于对照;滇紫甘薯对 3 种自由基的清除能力表现为 ABTS 自由基 > DPPH 自由基 > 羟自由基,说明滇紫甘薯对 ABTS 自由基清除能力最强,且与含量呈正相关。其中, β -胡萝卜素含量在滇紫甘薯 24 号中较低,但其他营养物质含量均较高,尤其绿原酸含量最高,且对 ABTS 和 DPPH 2 种自由基的 EC_{50} 较小;滇紫甘薯 54 号花色苷含量、总黄酮含量和总还原力最高,清除 ABTS 和 DPPH 2 种自由基的 EC_{50} 最小,抗氧化活性最强。主成分分析结果表明,滇紫甘薯 24 号和滇紫甘薯 54 号抗氧化组分较为均衡,滇紫甘薯 24 号和滇紫甘薯 54 号可作为功能型食品添加剂或保健食品原料使用,具有广阔的应用前景。

关键词:滇紫甘薯品种;抗氧化物质;自由基;抗氧化活性;花色苷;主成分分析

中图分类号:S531.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0179-07

紫甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 具有低投入、高产出、抗病、耐旱、耐瘠、耐贮藏等特性,尤其适合云南山地农业生态条件,是云南发展高原特色农业、效益农业的有效途径^[1]。紫甘薯肉质呈紫色至紫黑色,不仅外观诱人,营养丰富,还含有多酚类活性物质和 β -胡萝卜素^[2]。多酚类物质主要包括黄酮类、酚酸类、二苯乙烯类和木脂素类^[3]。花色苷是一种水溶性色素,属于黄酮类化合物^[4],因其高效的抗氧化作用而引起了人们的关注^[5]。紫甘薯块根中的花色苷主要为芳香族有机酸酰化的花色苷^[6],具有着色能力强、水溶性和稳定性好的特点,已做成酸奶^[7]、紫薯抗氧化面膜^[8]等,可广泛应用于保健品饮料等食品工业及医药和化妆品领域^[9]。 β -胡萝卜素是自然界中最普遍和最稳定的类胡萝卜素,具有保护视力的作用。

不同甘薯基因型的酚酸和 β -胡萝卜素的含量

差异很大^[10]。Rumbaoa 等测定的 5 个菲律宾甘薯品种的酚酸含量大不相同^[11]。绿原酸是甘薯中主要的酚酸,也具有清除自由基的能力^[12]。Teow 等测定了 19 个不同薯肉颜色(白色、奶油色、黄色、橙色和紫色)的甘薯的 β -胡萝卜素含量,变幅也比较大^[13]。此外,Khan 等还分析了甘薯叶片和块根中类胡萝卜素的含量和组成,叶片类胡萝卜素的组成和其他植物叶片相似,含 45%~50% 叶黄素和 30% β -胡萝卜素,但块茎中却含有一些特殊的类胡萝卜素,如 β -胡萝卜素-5,8-环氧化物、 β -胡萝卜素-5,6,5',8'-二环氧化物和 β -胡萝卜素-5,8',8'-环氧化物^[14]。前人研究报道显示,橙肉甘薯富含反式 β -胡萝卜素,可满足学龄前儿童维生素 A 的日常需求,是预防夜盲症的良好维生素 A 来源^[15]。

山川紫是日本育成的紫黑色甘薯品种,该品种抗病,结薯多而均匀,薯块出粉率为 18%,是我国甘薯主产区的主栽品种^[16]。甘薯是云南省第二大薯类作物,但云南省却长期缺乏自主选育的适应云南山地生态环境的甘薯品种。滇紫甘薯 24、54、88、92、112 号是云南农业大学新选育的紫甘薯品种,但还未有人对其抗氧化物质和抗氧化活性进行评价。因此,本研究将以主栽品种山川紫为对照,测定滇紫甘薯 24、54、88、92、112 号的抗氧化成分含量,总

收稿日期:2022-12-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:32060500);云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(编号:YNWR-QNBJ-2020-138);云南省基础研究计划面上项目(编号:202301AT070501)。

作者简介:王 琼(1963—),女,云南宾川人,硕士,高级实验师,主要从事薯类作物机械化栽培研究。E-mail:gaze12@sohu.com。

通信作者:肖继坪,博士,副教授,主要从事薯类作物次生代谢物质相关基因及功能分析研究。E-mail:xiaojiping82@126.com。

还原力和清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、羟自由基的能力,比较它们的抗氧化物质含量及活性差异,为滇紫甘薯系列保健食品的开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

滇紫甘薯 24、54、88、92、112 号为云南农业大学薯类作物研究所新选育的紫甘薯品种,山川紫由徐州市农业科学院引进,均以相同的栽培条件种植于云南农业大学后山农场,成熟后收获块根作为试验材料,本试验在云南农业大学薯类作物研究所进行。

无水乙醇,天津市风船化学试剂科技有限公司;甲醇,重庆川东化工(集团)有限公司;盐酸、硫酸亚铁、乙二醇四乙酸、过硫酸钾、丙酮、邻二氮菲、抗坏血酸,西陇化工股份有限公司;十二水合磷酸氢二钠、磷酸二氢钾,广东光华科技股份有限公司;双氧水,江苏强盛功能化学股份有限公司;以上试剂均为分析纯。1,1-二苯基-2-苦基肼自由基(DPPH),东京化成工业株式会社;核黄素,北京索莱宝科技有限公司;硝基氯化四氮唑蓝(NBT),BIOSHARP;芸香苷、L-蛋氨酸、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS),生工生物工程(上海)股份有限公司;绿原酸、Amberlite XAD-7 大孔吸附树脂、矢车菊素 3-O-葡萄糖苷, Sigma-Aldrich;总酚试剂盒,苏州格锐思生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

AL104 电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;SB-4200DTD 超声波清洗仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;Heidolph LABOROTA 4000 旋转蒸发仪(德国);SHZ-D(III)防腐双表双抽循环水真空泵,巩义市予华仪器有限责任公司;CHRIST ALPHA 1-2 型冷冻干燥机(德国);HWS-12 电热恒温水浴锅,上海齐欣科学仪器有限公司;冷冻离心机,天美(中国)科学仪器有限公司;低速离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;TU-1810 紫外可见光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 不同紫甘薯品种花色苷含量测定 参照 Reyes 等的酸醇提取方法^[17-18]加以改进。洗净新鲜的紫甘薯块根,用四分法取样 15 g,液氮研磨成

粉,舀入已去零的小烧杯中称取 3 g,加入 60 mL 1.5 mol/L 盐酸和 95% 乙醇($V:V=15:85$)提取液,超声波提取 30 min,抽滤,收集残渣再加入 30 mL 提取液超声波提取 30 min,抽滤,合并 2 次的提取液。采用 pH 值示差法测定紫甘薯鲜薯的总花色苷含量^[19-20]。用于抗氧化的花色苷的提取和纯化采用肖继坪等的方法^[21],得到的总花色苷提取物浸膏冷冻干燥成粉,提取物的总花色苷含量利用标准曲线法测定^[22]。

1.3.2 不同紫甘薯品种总黄酮含量的测定 总黄酮含量的测定参照 Do 等的方法^[23],略做改动:取 1 g 洗净新鲜紫甘薯块根,采用 1% 盐酸乙醇溶液浸提,在超声水浴锅(30 ℃)中提取 20 min,最后静置 30 min,离心分离,提取上清液待测。以试剂空白为对照,510 nm 波长下读取紫甘薯鲜薯中总黄酮的吸光度。根据芸香苷浓度(C)与吸光度(D)的关系计算所测样品溶液的含量。

1.3.3 绿原酸含量的测定 绿原酸含量的测定参考王静的方法^[24]。取 0.1 g 紫甘薯干样,用 70% 乙醇按料液比 1 g:100 mL 提取,超声波辅助提取 3 次,每次 10 min,离心分离后,得到绿原酸上清液。以 70% 乙醇为空白对照,采用石英比色皿在波长为 327 nm 的紫外分光光度计下测定绿原酸溶液的吸光度,以绿原酸做标准曲线并计算紫甘薯干样中绿原酸含量。

1.3.4 总酚含量的测定 总酚含量用总酚试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司;G0117 F)进行测定。

1.3.5 β -胡萝卜素含量的测定 β -胡萝卜素含量采用张允刚等的行业标准^[25]测定:取 2 g 新鲜紫甘薯块根,采用丙酮作为提取液,反复研磨多次,至残渣变白后离心提取上清液。以丙酮为空白对照,在 454 nm 波长下测定 β -胡萝卜素溶液的吸光度,并计算出紫甘薯鲜样中 β -胡萝卜素的含量。计算公式: $Y=13.1X-0.8$ (式中:13.1 为回归系数; X 为丙酮溶液吸光度;0.8 为直线回归截距; Y 为 β -胡萝卜素的含量,mg/100 g)。

1.3.6 总还原力的测定^[26] 总还原力的测定采用铁离子还原/抗氧化能力(FRAP)法^[26]测定,分别加入提取液 2.0 mL、0.2 mol/L 磷酸缓冲液(PBS)(pH 值 6.6)0.4 mL、1% $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液 1.0 mL 于试管中,摇匀,50 ℃ 水浴避光反应 20 min,然后加入 1% 三氯乙酸溶液 2.0 mL,摇匀。取反应液 4 mL,加

入去离子水 7.5 mL 和 1% FeCl_3 溶液 0.3 mL 于试管中,混匀,黑暗中静置 5 min 后在 700 nm 波长处测定吸光度($D_{700\text{ nm}}$),以去离子水为空白对照。每个样品 3 次重复,取平均值,吸光度越大总还原力越大。

1.3.7 自由基清除率的测定 抗氧化活性的测定采用肖继坪等的方法^[22],将上文中提取的花色苷溶液用去离子水稀释成不同浓度梯度。其中,花色苷的浓度梯度在测定 1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)自由基清除率时为 6、14、22、30、36、38、46、48、54、60、72、84、96、108、120 $\mu\text{g/mL}$;花色苷的浓度梯度在测定 ABTS 自由基清除率时为 4、8、12、16、20、24、28、36、48、60、72、84 $\mu\text{g/mL}$;羟自由基清除率测定时花色苷的浓度梯度为 10、12、14、16、18、20、22、24、28、32、36、40 $\mu\text{g/mL}$ 。分别将花色苷各个浓度梯度的稀释液与对应的 DPPH 工作液、ABTS 工作液、羟自由基工作液充分混匀作为样品组,去离子水与各工作液混合作为对照组。反应后分别测定 $D_{517\text{ nm}}$ 、 $D_{734\text{ nm}}$ 、 $D_{536\text{ nm}}$,从而计算出花色苷溶液对各自由基的清除率。

1.3.8 数据分析 本试验采用 GraphPad Prism (8.4.2) 对数据进行整理和计算;用 Rstudio (4.0.4) 进行主成分分析,并对不同紫甘薯品种抗氧化成分排序。采用 EC_{50} 计算软件计算 EC_{50} (EC_{50} :半最大效应浓度,指自由基清除率达到 50% 时所需要的样品含量), EC_{50} 越小表示样品的抗氧化性越强。

2 结果与分析

2.1 不同紫甘薯品种花色苷含量测定结果

由表 1 可知,新选育的紫甘薯新品种的总花色苷含量都超过了对照品种山川紫,含量在 10.30 ~ 138.80 $\text{mg}/100\text{ g}$ 之间,其中新品种滇紫甘薯 54 和 24 号的花色苷含量最高。

表 1 不同紫甘薯品种总花色苷含量

品种	总花色苷含量($\text{mg}/100\text{ g}$)		最大吸收波长 (nm)
	鲜薯	粗提液冻干粉	
山川紫	10.3	270	530.5
滇紫甘薯 24 号	137.7	880	533.0
滇紫甘薯 54 号	138.8	980	527.0
滇紫甘薯 88 号	24.0	400	531.0
滇紫甘薯 92 号	13.0	350	527.0
滇紫甘薯 112 号	37.2	420	529.0

2.2 不同紫甘薯品种粗提液冻干粉中花色苷的含量

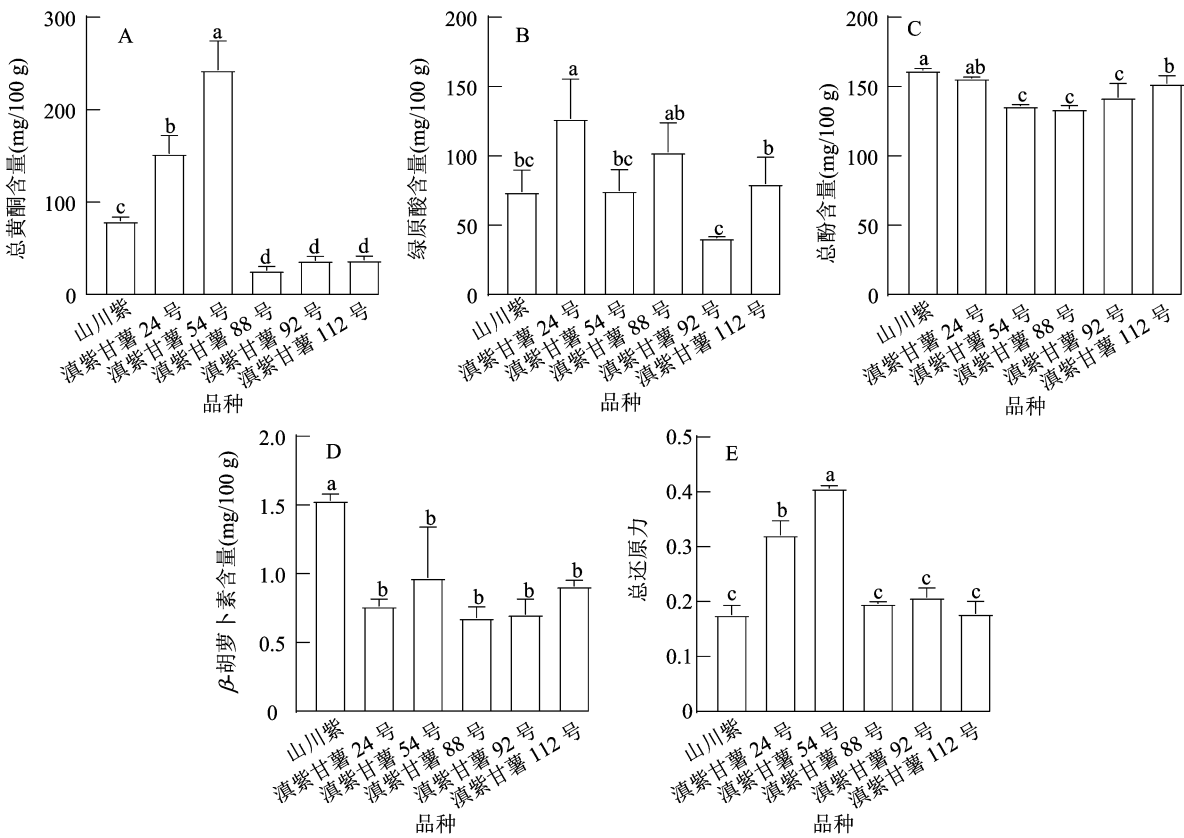
称取 1 mg 不同紫甘薯品种粗提液冻干粉溶于 1 mL 去离子水中,配制成 1 mg/mL 的花色苷溶液。根据标准曲线法计算得出:1 mg/mL 不同紫甘薯品种的花色苷溶液中所含的纯花色苷含量。由表 1 可知,山川紫的粗提液冻干粉中花色苷的含量为 2.7 $\mu\text{g}/\text{mg}$,即 1 mg 山川紫冻干粉中含有纯花色苷 2.7 μg 。为比较纯花色苷的抗氧化活性在不同紫甘薯品种中的强弱,采用等含量的冻干粉中所含的纯花色苷含量测定。

2.3 不同紫甘薯品种的其他抗氧化成分含量

不同紫甘薯品种抗氧化成分含量不同。由图 1 可知,总黄酮含量变幅在 26.35 ~ 243.31 $\text{mg}/100\text{ g}$ 之间;绿原酸含量在 40.87 ~ 127.04 $\text{mg}/100\text{ g}$ 之间;总酚含量在 134.11 ~ 161.92 $\text{mg}/100\text{ g}$ 之间; β -胡萝卜素含量在 0.68 ~ 1.53 $\text{mg}/100\text{ g}$ 之间;总还原力(吸光度)在 0.18 ~ 0.41 之间。由表 1 和图 1 可知,滇紫甘薯 54 号的总黄酮、花色苷含量最高且总还原力最强;滇紫甘薯 24 号的绿原酸含量最高,花色苷、总黄酮、总酚含量和总还原力次高;滇紫甘薯 88 号的总黄酮、总酚和 β -胡萝卜素含量最低;对照山川紫的总酚和 β -胡萝卜素含量最高,总还原力最低。同一紫甘薯品种的不同抗氧化成分含量也不同,其表现在总黄酮含量高于花色苷含量,总酚含量高于绿原酸含量,花色苷含量高于 β -胡萝卜素含量等。不同紫甘薯品种的总还原力强弱顺序为滇紫甘薯 54 号 > 滇紫甘薯 24 号 > 滇紫甘薯 92 号 > 滇紫甘薯 88 号 > 滇紫甘薯 112 号 > 山川紫。

2.4 不同紫甘薯品种抗氧化组分和总还原力的主成分分析

为综合评价各紫甘薯品种的抗氧化组分,对不同紫甘薯品种的抗氧化组分和总还原力进行主成分分析,以 >1 的特征值为标准,共有 2 个主成分。由表 2 可知,第 1 主成分的特征值为 2.852,方差贡献率为 47.534%,第 2 主成分的特征值为 1.608,方差贡献率为 26.807%,累计贡献率为 74.341%。由表 2 和图 2 可知,第 1 主成分为总花色苷含量、总黄酮含量、绿原酸含量、总还原力,且呈正向分布,即组分 1 正向坐标值越大,花色苷含量、总黄酮含量、绿原酸含量、总还原力越高。第 2 主成分为总酚含量、 β -胡萝卜素含量,组分 2 呈正向分布,坐标值越



A、B、C、D、E 分别代表不同紫甘薯品种的总黄酮含量、绿原酸含量、总酚含量、 β -胡萝卜素含量、总还原力；柱上不同小写字母表示品种间差异显著($P<0.05$)

图1 不同紫甘薯品种的抗氧化成分含量及总还原力

表2 不同紫甘薯品种抗氧化组分和总还原力主成分分析结果

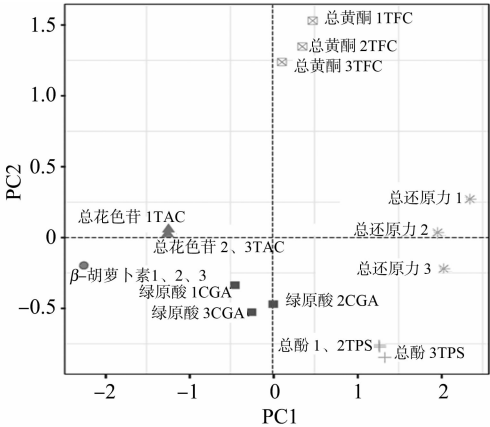
品质因子	主成分 1	主成分 2
总黄酮含量	0.919	-0.132
总花色苷含量	0.918	-0.342
绿原酸含量	0.469	-0.072
总酚含量	0.130	0.827
β -胡萝卜素含量	0.182	0.860
总还原力	0.946	0.215
特征值	2.852	1.608
累计贡献率(%)	47.534	74.341

大,总酚含量 β -胡萝卜素含量越高。

2.5 不同紫甘薯品种花色苷的抗氧化活性分析

由皮尔森相关系数分析结果(表3)可知,总花色苷含量与总黄酮含量的相关系数为 0.869,总花色苷含量与总还原力的相关系数为 0.780,总黄酮含量与总还原力的相关系数为 0.857,均呈极显著正相关。因此,推测总黄酮中的花色苷是紫甘薯的主要抗氧化活性物质。

2.5.1 不同紫甘薯品种花色苷的 DPPH 自由基清除效果 由图 3 可知,花色苷的 DPPH 自由基清除



图中 1、2、3 代表 3 次重复

图2 不同紫甘薯品种抗氧化组分和总还原力主成分分析

率在不同紫甘薯品种中随花色苷浓度的增大而增大,当浓度达到 54 $\mu\text{g/mL}$ 时,不同紫甘薯品种花色苷的 DPPH 自由基清除率均高达 95% 以上。清除 DPPH 自由基能力最强的是滇紫甘薯 54 号。

2.5.2 不同紫甘薯品种花色苷的 ABTS 自由基清除效果 由图 4 可知,不同紫甘薯品种花色苷的 ABTS 自由基清除率随花色苷浓度的增大而增大,当质量浓度达到 28 $\mu\text{g/mL}$ 时,不同紫甘薯品种花色

表 3 不同紫甘薯品种抗氧化组分和总还原力相关性分析结果

指标	相关系数					
	总黄酮含量	总花色苷含量	绿原酸含量	总酚含量	β -胡萝卜素含量	总还原力
总黄酮含量	1.000					
总花色苷含量	0.869**	1.000				
绿原酸含量	0.168	0.444	1.000			
总酚含量	-0.102	-0.088	0.157	1.000		
β -胡萝卜素含量	0.149	-0.182	-0.079	0.480*	1.000	
总还原力	0.857**	0.780**	0.318	0.269	0.362	1.000

注:表中*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$)。

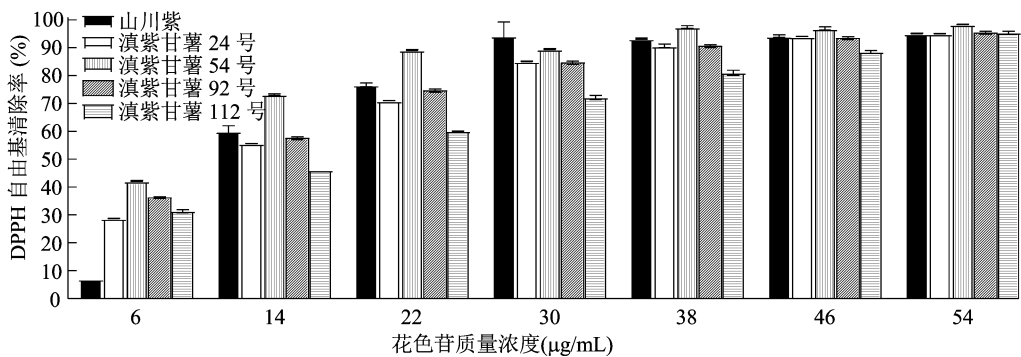


图3 不同紫甘薯品种花色苷的 DPPH 自由基清除能力

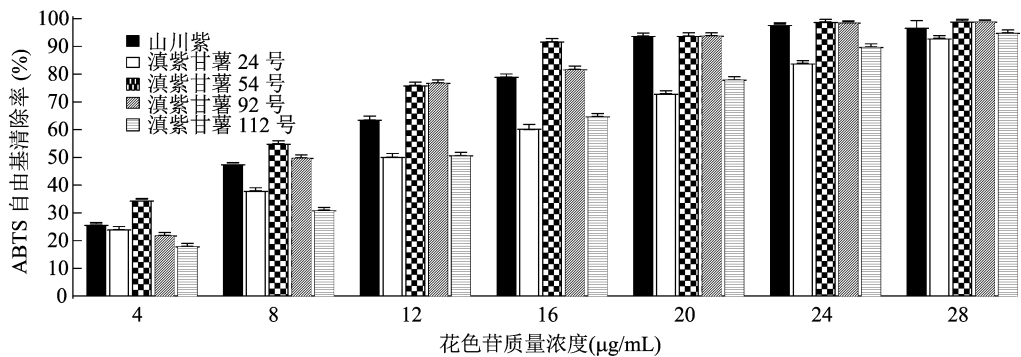


图4 不同紫甘薯品种花色苷的 ABTS 自由基清除能力

苷的 ABTS 自由基清除率均高达 93% 以上。同样地, 滇紫甘薯 54 号清除 ABTS 自由基的能力也是最强的。

由图 5 可知, 滇紫甘薯 88 号花色苷的 ABTS、DPPH 自由基清除率随花色苷浓度的增大而增大, 当质量浓度分别达 60、96 $\mu\text{g/mL}$ 时, 滇紫甘薯 88 号花色苷的 ABTS、DPPH 自由基清除率均高达 93% 以上, 并从图上也可看出对 ABTS 自由基清除能力更强。由图 3、图 4、图 5 可知, 滇紫甘薯 54 号清除 DPPH、ABTS 自由基的能力最强, 滇紫甘薯 24 号居中, 滇紫甘薯 88 号最弱。

2.5.3 不同紫甘薯品种花色苷的羟自由基清除能

力 由图 6 可知, 不同紫甘薯品种花色苷的羟自由基清除率随花色苷质量浓度的增大而增大。山川紫、滇紫甘薯 54 号的羟自由基清除率较强, 而滇紫甘薯 88、92、24、112 号清除羟自由基的能力较上述品种弱。

2.5.4 紫甘薯花色苷及维生素 C 清除 3 种自由基的 EC_{50} 由表 4 可知, 滇紫甘薯花色苷清除 3 种自由基的 EC_{50} 都比维生素 C 的小, 说明滇紫甘薯花色苷的抗氧化活性较维生素 C 好。通过对冻干粉中花色苷折算成纯净的花色苷复合物后, 花色苷复合物清除自由基的能力是等量维生素 C 的几倍到几十倍。

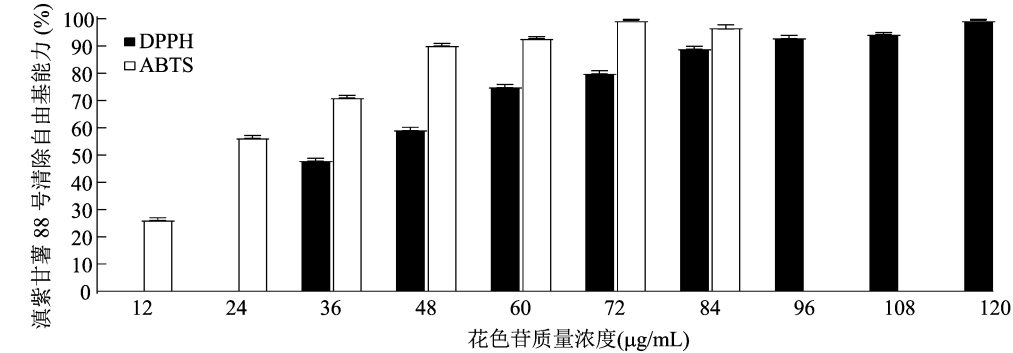


图5 滇紫甘薯 88 号花色苷的 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力

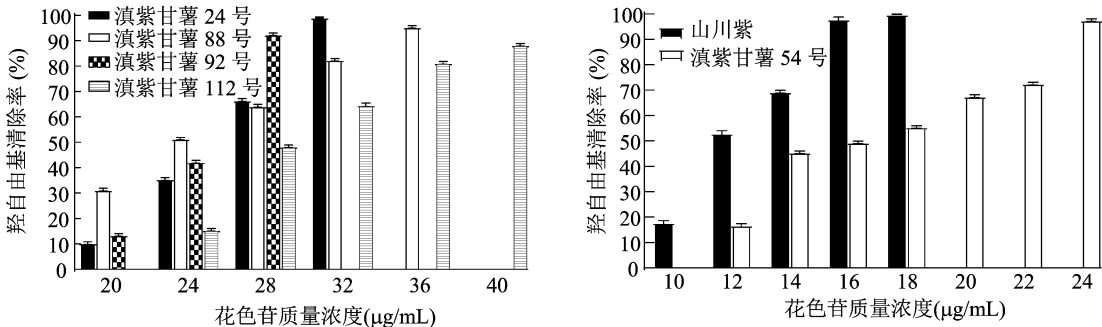


图6 不同紫甘薯品种花色苷的羟自由基清除能力

表 4 紫甘薯花色苷及维生素 C 清除 3 种自由基的 EC₅₀

抗氧化剂	EC ₅₀ (μg/mL)		
	DPPH 自由基	ABTS 自由基	羟自由基
山川紫花色苷	14.1	7.4	11.8
滇紫甘薯 24 号花色苷	11.2	9.5	24.4
滇紫甘薯 54 号花色苷	7.7	6.4	15.9
滇紫甘薯 88 号花色苷	43.9	20.1	23.7
滇紫甘薯 92 号花色苷	10.0	7.3	23.8
滇紫甘薯 112 号花色苷	13.2	9.8	29.4
维生素 C	82.8	58.0	317.0

3 讨论与结论

不同滇紫甘薯品种的花色苷含量和总还原力均高于对照;滇紫甘薯对 3 种自由基的清除能力表现为 ABTS 自由基>DPPH 自由基>羟自由基,提示滇紫甘薯花色苷对 ABTS 具有很好的清除能力,且与花色苷浓度呈正相关;滇紫甘薯花色苷清除 3 种自由基的 EC₅₀均比维生素 C 小,提示滇紫甘薯花色苷对 ABTS 自由基、DPPH 自由基、羟自由基的清除能力要高于维生素 C。

滇紫甘薯 24 号除β-胡萝卜素含量较低外,其他营养物质含量均较高,尤其绿原酸含量最高,且对 ABTS 和 DPPH 2 种自由基的清除能力较好;滇紫

甘薯 54 号花色苷清除 ABTS、DPPH 自由基的 EC₅₀ 最小,具有很好的抗氧化活性,且它的花色苷含量、总黄酮含量和总还原力均最高。经过主成分分析表明,滇紫甘薯 24 号和滇紫甘薯 54 号抗氧化组分较为均衡,因此,滇紫甘薯 24 号和滇紫甘薯 54 号可作为功能型食品添加剂或配料使用,具有广阔的应用前景。

不同滇紫甘薯品系中滇紫甘薯 54 号总花色苷含量、总黄酮含量和总还原力最高,分别达 138.80 mg/100 g、243.31 mg/100 g、0.41;这与史光辉等的研究结果^[27]相似;滇紫甘薯 24 号绿原酸含量最高,达 127.04 mg/100 g;山川紫的总酚含量和β-胡萝卜素含量最高,分别达 161.92、1.53 mg/100 g。相同紫甘薯品种总酚含量高于绿原酸含量,总黄酮含量高于总花色苷含量,且总还原力与总花色苷和总黄酮含量呈极显著正相关,因此推测紫甘薯中的抗氧化活性物质主要为花色苷,这与王洪云等的研究结果^[28]一致。

紫甘薯花色苷为混合成分^[29],它的苷元主要为矢车菊素、芍药色素和天竺葵色素^[30],根据母核上的取代基团不同而形成不同种类的花色苷。滇紫甘薯 54 号的总花色苷含量和总还原力最高,清除 DPPH、ABTS 自由基的 EC₅₀ 最小,但清除羟自由基

的 EC_{50} 却高于山川紫,提示这是由于花色苷母核上连接的官能团不同导致的,该官能团可能对 ABTS 和 DPPH 自由基的清除效果较好^[30]。山川紫的 β -胡萝卜素和总酚含量最高,清除羟自由基的 EC_{50} 最小,推测酚类物质^[31]或 β -胡萝卜素^[32]可以很好地清除羟自由基。

参考文献:

- [1] 孟凡来,郭华春.不同甘薯品种抗 UV-B 辐射增强的效应分析[J]. 中国农业气象,2019,40(5):293-300.
- [2] Dako E, Retta N, Desse G. Comparison of three sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] varieties on nutritional and anti-nutritional factors[J]. 2016,16(4):1-11.
- [3] Chen X, Xiong J, He L X, et al. Effects of *in vitro* digestion on the content and biological activity of polyphenols from *Acacia mearnsii* bark[J]. Molecules,2018,23(7):1804.
- [4] Sun Y Y, Qiu Y, Duan M M, et al. Identification of anthocyanin biosynthesis related microRNAs in a distinctive Chinese radish (*Raphanus sativus* L.) by high-throughput sequencing [J]. Molecular Genetics and Genomics,2017,292(1):215-229.
- [5] Chopra M, Fitzsimons P E E, Strain J J, et al. Nonalcoholic red wine extract and quercetin inhibit LDL oxidation without affecting plasma antioxidant vitamin and carotenoid concentrations[J]. Clinical Chemistry,2000,46(8):1162-1170.
- [6] 江连洲,王晰锐,张超,等. HPLC-MS 法鉴定不同品种紫甘薯中花色苷组成[J]. 中国食品学报,2011,11(5):176-181.
- [7] 胡志和,夏磊,李艳军,等. 添加紫薯提取物和酪蛋白水解物酸奶降血压和护肝功能评价[J]. 食品科学,2018,39(7):207-214.
- [8] Kistriyani L, Sahid A C M, Mutiara T, et al. Characteristic of membrane from purple sweet potato (*Ipomea batatas*) as antioxidant face mask[J]. Key Engineering Materials,2018,773:354-359.
- [9] Susanti I, Wijaya H, Hasanah F, et al. Copigmentation of anthocyanin extract of purple sweet potatoes (*Ipomea batatas* L.) using ferulic acid and tannic acid [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,116:012006.
- [10] Harrison H F, Mitchell T R, Peterson J K, et al. Contents of caffeoylquinic acid compounds in the storage roots of sixteen sweetpotato genotypes and their potential biological activity [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science,2008,133(4):492-500.
- [11] Rumbaoa R G O, Cornago D F, Geronimo I M. Phenolic content and antioxidant capacity of Philippine sweet potato (*Ipomoea batatas*) varieties[J]. Food Chemistry,2009,113(4):1133-1138.
- [12] Dubey R K, Upadhyay G, Singh V, et al. Antioxidant potential and free radical scavenging activity of *Parkia roxburghii*, G. Don, a lesser known leguminous tree from North East India[J]. South African Journal of Botany,2020,131:454-461.
- [13] Teow C C, Truong V D, McFeeters R F, et al. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours[J]. Food Chemistry,2007,103(3):829-838.
- [14] Khan M Z, Takemura M, Maoka T, et al. Carotenoid analysis of sweetpotato *Ipomoea batatas* and functional identification of its lycopene β - and ϵ -cyclase genes[J]. Zeitschrift Für Naturforschung C,2016,71(9/10):313-322.
- [15] Gannon B M. Towards an integrated mathematical model of nutrient metabolism:linking β -carotene and vitamin A[J]. The Journal of Nutrition,2021,151(3):465-467.
- [16] 王志良,李松坚,李润生. 改良山川紫甘薯的加工利用[J]. 中国种业,2004(11):15-16.
- [17] Reyes L F, Miller J C, Cisneros-Zevallos L. Antioxidant capacity, anthocyanins and total phenolics in purple- and red-fleshed potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes[J]. American Journal of Potato Research,2005,82(4):271-277.
- [18] 刘平,杜红,李忠会. 提取剂对紫薯中花青素提取效果的影响[J]. 中国食品,2021(13):94.
- [19] 耿然,刘贵巧,王慧真,等. pH 示差法测定黑小麦全麦粉花色苷及其体外抗氧化性[J]. 食品工业科技,2020,41(1):6-11.
- [20] 张雯莉,刘玉冰. 不同外源缓解物质对混合盐胁迫下两种枸杞生理特性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(3):319-325.
- [21] 肖继坪,郭华春. 云南马铃薯地方彩色品种“剑川红”和“转心乌”的花色苷主成分分析[J]. 天然产物研究与开发,2012,24(4):503-506,497.
- [22] 肖继坪,杨晓艳,郭华春. 彩色马铃薯“剑川红”和“转心乌”花色苷的抗氧化分析[J]. 食品科学,2016,37(13):13-18.
- [23] Do Q D, Angkawijaya A E, Tran-Nguyen P L, et al. Effect of extraction solvent on total phenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Limnophila aromatica* [J]. Journal of Food and Drug Analysis,2014,22(3):296-302.
- [24] 王静. 甘薯茎叶中绿原酸提取方法的研究及含量测定研究[J]. 化工管理,2019(11):22-23.
- [25] 张允刚,房伯平. 甘薯种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006:89.
- [26] 申光辉,李志洪,赵清锋,等. 以紫色马铃薯酶解汁液为辅料的浓色啤酒发酵工艺优化及抗氧化活性[J]. 华南农业大学学报,2021,42(2):124-132.
- [27] 史光辉,胡志和,吴子健,等. 贮藏温度对 3 种甘薯品质的影响[J]. 核农学报,2015,29(3):493-498.
- [28] 王洪云,张毅,孔秀林,等. 紫甘薯花色苷体内抗氧化能力研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2019,37(4):32-36,48.
- [29] 赵静. 紫甘薯花青素的生物利用与体内代谢研究[D]. 徐州:江苏师范大学,2018.
- [30] 靳艳玲,丁凡,刘国强,等. 紫甘薯花青素的成分特点及产品研发[J]. 粮食与饲料工业,2020(4):38-43.
- [31] 李霄,陈慧,周苗苗. 马铃薯皮中多酚类物质的抗氧化性研究[J]. 当代化工,2017,46(8):1509-1512.
- [32] Cho S O, Kim M H, Kim H. β -carotene inhibits activation of NF- κ B, activator protein-1, and STAT3 and regulates abnormal expression of some adipokines in 3T3-L1 adipocytes[J]. Journal of Cancer Prevention,2018,23(1):37-43.