

# 紫甘薯醋及其不同发酵阶段产物的抗氧化活性

张村雪<sup>1</sup>, 朱渭兵<sup>2</sup>, 李志西<sup>1\*</sup>, 殷路萍<sup>1</sup>, 刘健书<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.杨凌金薯种业科技有限公司, 陕西 杨凌 712100;  
3.陕西省功能食品工程技术研究中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:**以紫甘薯(黑薯1号)为原料, 采用液态深层发酵法酿制紫甘薯醋, 测定其不同发酵阶段产物(糖化醪、酒醪、醋液)对DPPH自由基和ABTS<sup>+</sup>·的清除能力以及Fe<sup>3+</sup>还原能力, 并且与白心、黄心、橘黄心薯肉的甘薯进行抗氧化活性比较研究。结果表明:紫甘薯(黑薯1号)抗氧化能力最高, 白心甘薯(秦薯5号)次之, 橘黄心与黄心甘薯(红心648、阳东锦栗薯)最低。甘薯发酵产物的抗氧化活性与多酚类物质含量有显著的相关性( $P < 0.01$ )。紫甘薯醋的DPPH自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>·清除能力、Fe<sup>3+</sup>还原能力均较其糖化醪、酒醪有所提高, 其他3种甘薯醋酸发酵前后的糖化醪、酒醪和醋液的抗氧化能力也有一定差异, 醋液抗氧化能力显著升高。实验证明:紫甘薯糖化醪、酒醪、醋液都具有很强的抗氧化能力, 其中醋液的抗氧化能力最强。

**关键词:** 抗氧化; 紫甘薯; 甘薯醋

## Antioxidant Properties of Purple Sweet Potato Vinegar and Intermediate Products at Different Fermentation Stages

ZHANG Cun-xue<sup>1</sup>, ZHU Wei-bing<sup>2</sup>, LI Zhi-xi<sup>1\*</sup>, YIN Lu-ping<sup>1</sup>, LIU Jian-shu<sup>3</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Yangling Jingshu Sweet Potato Seed Co. Ltd., Yangling 712100, China;

3. Shaanxi Provincial Functional Foods Engineering Technology Research Center, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Purple sweet potato vinegar was produced by liquid-state submerged fermentation. The antioxidant properties including reducing power, and DPPH free radical and ABTS<sup>+</sup>· scavenging activity *in vitro* of the vinegar and its intermediate products at different fermentation stages were investigated. The results indicated that purple-fleshed sweet potato "Heishu No. 1" exhibited the highest antioxidant activity, followed by white-fleshed sweet potato "Qinshu No. 5", while yellow-fleshed sweet potato "Yangdong Jinli" and orange-colored-fleshed "Hongxin No. 648" showed the lowest antioxidant capacity. Our results also showed a highly significant correlation between antioxidant capacity and total polyphenols content ( $P < 0.01$ ). Additionally, reducing power, DPPH free radical and ABTS<sup>+</sup>· scavenging ability of purple-fleshed sweet potato vinegar were higher than those of saccharified slurry and mash. Some differences among products from other sweet potato cultivars were also observed for antioxidant properties. Therefore, purple sweet potato saccharified slurry, wort and vinegar can be used as good dietary sources of antioxidants due to potent antioxidant activity.

**Key words:** antioxidant activity; purple sweet potato; sweet potato vinegar

中图分类号: TS255.47

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)11-0088-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201311020

紫甘薯属旋花科一年生草本植物, 是甘薯的一个特殊品种, 又名黑红薯, 薯皮黑紫色, 薯肉紫红色, 是日本九州农业实验场培育出的高色素新品种, 由于富含花青素、植物蛋白、多糖、维生素、矿质元素等多种重要活性成分而一度成为研究和开发的热点<sup>[1-3]</sup>。据日本学者须田郁夫等<sup>[4]</sup>研究表明, 紫色甘薯具有极强的抗氧化活

性, 可去除活性氧, 预防高血压, 改善肝功能, 减少基因突变, 抑制诱癌物质的产生。

国内外关于紫甘薯汁、紫甘薯酒、紫甘薯乳酸饮料和紫甘薯醋的抗氧化活性<sup>[5-7]</sup>已有报道。日本学者须田郁夫等<sup>[8]</sup>通过实验表明紫甘薯汁可以清除体内自由基, 推迟动脉硬化中LDL(低密度脂蛋白)的氧化。王杉等<sup>[9]</sup>研究表

收稿日期: 2012-03-23

基金项目: 秦岭北麓野生资源开发及发酵技术创新项目(A304021104); 国家农业标准化示范区项目(SFQ7-428)

作者简介: 张村雪(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为发酵技术创新。E-mail: zhangcunxue86@yahoo.cn

\*通信作者: 李志西(1958—), 男, 教授, 博士, 研究方向为谷物功能食品及发酵食品。E-mail: lzx580721@yahoo.com.cn

明, 紫甘薯色素具有显著的抗生物氧化作用, 可延缓衰老。楚文靖等<sup>[10]</sup>研究表明, 由 $m(\text{熟紫薯}):V(\text{水})=1:1.5$ 酿造的紫甘薯酒比相同酒精度(约11%)的干红葡萄酒具有更强的抗氧化能力, 且发酵后紫甘薯酒的抗氧化活性与紫甘薯汁相当。Terahara等<sup>[11]</sup>对不同品种的食用醋(白醋、黑醋、鱼醋、苹果醋、紫甘薯醋)进行比较, 结果显示紫甘薯醋与其他醋相比, 具有更强的清除游离 $O_2^-$ 和DPPH自由基的活性。但是对于紫甘薯醋发酵阶段产物(糖化醪、酒醪、醋液)抗氧化活性比较研究的报道尚且少见。本研究以紫甘薯(黑薯1号)、黄心甘薯(阳东锦栗薯)、白心甘薯(秦薯5号)、橘黄心甘薯(红心648)为原料, 比较紫甘薯与其他3个品种甘薯的糖化醪、酒醪及醋液抗氧化活性的强弱, 为紫甘薯的开发及深加工提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

黑薯1号、秦薯5号及红心648(黑薯1号薯肉深紫色, 秦薯5号薯肉为白色, 红心648薯肉橘黄色) 杨凌金薯种业科技有限公司; 阳东锦栗薯(薯肉为黄色) 仲恺农业工程学院(广州)。枣醋(1)由实验室自制。4.5g/100mL(以醋酸计)。干枣加4倍水进行酒精发酵, 发酵结束后浆渣分离, 得酒醪, 采用液态深层发酵法酿制成枣醋, 酸度。

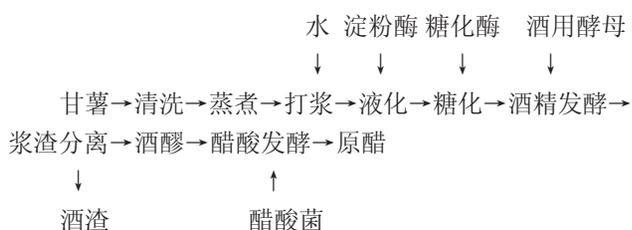
淀粉酶、糖化酶 北京奥博星生物技术有限责任公司; 酵母菌 湖北安琪酵母股份有限公司; 醋酸菌 上海中科伍佰豪生物工程有限公司; 福林酚试剂 上海荔达生物科技有限公司; 芦丁、没食子酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-连氨基双(3-乙基苯并噻唑啉)-6-磺酸(ABTS) 美国Sigma公司; 氯化钙、无水碳酸钠、无水乙醇、抗坏血酸、 $K_2S_2O_8$ 均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

UV-1700型紫外-可见分光光度计 日本岛津公司; TD5A型台式离心机 湖南凯达科学仪器有限公司; HH-S4型数显恒温水浴锅 北京科伟永兴仪器有限公司; THZ-82A型水浴恒温振荡器 金坛市杰瑞尔电器有限公司; KH5200B型超声波清洗器 昆山禾创超声仪器有限公司; 喷射式自吸发酵罐 实验室自制<sup>[12]</sup>。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 甘薯醋酿制工艺



将清洗后的甘薯蒸熟, 按照 $m(\text{熟甘薯}):V(\text{水})=1:1.3$ 加水打浆, 经液化、糖化等步骤后冷却, 得到糖化醪, 加入0.1g/100mL酒用活性干酵母, 置于酒精发酵罐内, 在25℃条件下酒精发酵3d, 4000r/min离心15min分离得到甘薯酒醪。再接入体积分数10%的醋酸菌种子液, 于34℃条件下采用喷射式自吸发酵罐<sup>[12]</sup>进行液态深层发酵。

#### 1.3.2 DPPH自由基清除能力测定

参照金杰等<sup>[13]</sup>所用方法, 略有改动。准确吸取稀释适当倍数的样品100 $\mu$ L, 用去离子水补至2mL, 同时加入2mL 0.1mmol/L的DPPH溶液, 摇匀, 避光放置30min后用无水乙醇作参比在波长510nm处测定其吸光度 $A_i$ , 同时测定2mL 0.1mmol/L DPPH溶液与2mL无水乙醇混合后的吸光度 $A_c$ , 以及2mL相应质量浓度的样品溶液与2mL无水乙醇混合后的吸光度 $A_j$ , 按式(1)计算清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100 \quad (1)$$

参照文献[14]方法即VCEAC法(VC当量质量浓度), 测定不同质量浓度VC对DPPH自由基的清除率, 以VC质量浓度(0~6mg/100mL)为横坐标, VC对DPPH自由基的清除率为纵坐标作图得标准曲线, 线性回归方程为:  $y = 10.3040x - 0.0883 (R^2 = 0.9988)$ 。样品的DPPH自由基清除能力以VC当量质量浓度(VCEAC)表示。

#### 1.3.3 ABTS<sup>+</sup>清除能力测定

参考Re等<sup>[15]</sup>方法。ABTS<sup>+</sup>由5mL 7mmol/L的ABTS溶液和88 $\mu$ L 140mmol/L的 $K_2S_2O_8$ 水溶液避光反应24h后生成。使用前用无水乙醇稀释至734nm波长处吸光度为1.00 $\pm$ 0.02, 稀释液当天使用。分别取稀释适当倍数的样品溶液200 $\mu$ L, 再加入4.8mL ABTS稀释液混匀, 避光反应15min, 以无水乙醇为对照, 在734nm波长处测定吸光度, 空白以相同体积甲醇代替样品反应, 按照式(2)计算样品的ABTS<sup>+</sup>清除率。

$$\text{ABTS}^+ \text{清除率}/\% = \frac{A_c - A_i}{A_c} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $A_c$ 为同体积甲醇代替样品反应的吸光度;  $A_i$ 为样品反应的吸光度。

用VC溶液为标准对照, 测定不同质量浓度VC对ABTS<sup>+</sup>的清除率, 以VC质量浓度(0~12mg/100mL)为横坐标, VC对ABTS<sup>+</sup>的清除率为纵坐标作图得标准曲线, 线性回归方程为:  $y = 6.2778x - 1.9964 (R^2 = 0.9981)$ , 样品的ABTS<sup>+</sup>清除能力用VC当量质量浓度(VCEAC)表示。

#### 1.3.4 Fe<sup>3+</sup>还原能力测定

参照Oyaizu<sup>[16]</sup>方法, 略有改动。分别取稀释适当倍数的样品溶液1mL, 加入2.5mL磷酸缓冲液(0.2mol/L pH6.6)混匀, 再加入1g/100mL的铁氰化钾溶液2.5mL; 50℃

水浴恒温20min后,加入10g/100mL的三氯乙酸溶液1mL,3000r/min离心10min,取上清液2.5mL,加去离子水2.5mL以及0.1g/100mL三氯化铁溶液0.5mL,在700nm波长处测定吸光度。用VC溶液为标准对照,测定不同质量浓度VC反应所得吸光度,以VC质量浓度(0~12mg/100mL)为横坐标,吸光度为纵坐标作图得标准曲线,线性回归方程为:  $y = 0.1010x - 0.0057 (R^2 = 0.9994)$ , 样品还原 $Fe^{3+}$ 能力用VC当量质量浓度(VCEAC)表示。

### 1.3.5 紫甘薯(黑薯1号)花色苷含量的测定

参考霍琳琳等<sup>[17]</sup>方法,略有改动。确定适当的稀释倍数,使样品吸光度在分光光度计的线性范围内;制备2个样品稀释液,其中一个用氯化钾缓冲液(0.2mol/L, pH1.0)稀释,另一个用醋酸钠缓冲液(0.2mol/L, pH4.5)稀释。将样品稀释液稳定15min后,用蒸馏水做空白,分别测定2种样品稀释液在520nm和700nm波长处的吸光度 $A$ 。按式(3)、(4)计算花色苷(以矢车菊-3-葡萄糖苷计)含量。

$$\text{总吸光度 } A = (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}1.0} - (A_{520\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}4.5} \quad (3)$$

$$\text{花色苷含量}(\text{mg/L}) = A \times M_w \times n \times 10^3 / (\epsilon \times l) \quad (4)$$

其中:  $M_w$ 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔质量(449.2g/mol);  $n$ 为稀释倍数;  $l$ 为比色皿的宽度(1cm);  $\epsilon$ 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数,26900L/(mol·cm);  $10^3$ 为转换系数。

### 1.3.6 总多酚含量的测定

参考Cai Yizhong等<sup>[18]</sup>方法,略有改动。以没食子酸为标准品,准确配制0.1mg/mL的没食子酸标准溶液,分别吸取此标准溶液0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0mL于10mL容量瓶中,依次加入Folin-Ciocalteu试剂2.0mL和7.5g/100mL的碳酸钠溶液2.0mL,去离子水定容至10mL,摇匀后显色2h,在波长765nm处测定吸光度。以没食子酸质量浓度(mg/mL)为横坐标,吸光度( $A_{765\text{nm}}$ )为纵坐标绘制标准曲线,得到线性回归方程:  $y = 88.429x + 0.0012 (R^2 = 0.9994)$ 。

将各样品稀释适当的倍数,配成样品溶液,准确吸取各样品溶液100 $\mu$ L,分别置于10mL容量瓶中,按上述方法分别测定吸光度( $A$ ),代入回归方程计算样品中的总多酚含量。

### 1.3.7 总黄酮含量的测定

参考李利华<sup>[19]</sup>方法,略有改动。以芦丁为标准品,将芦丁于120 $^{\circ}$ C干燥至恒质量,准确配制0.4mg/mL的标准溶液,分别吸取此标准溶液0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5mL于10mL容量瓶中,加入5g/100mL亚硝酸钠溶液0.5mL混合均匀,放置6min,然后加入10g/100mL硝酸铝溶液0.5mL混合均匀,放置6min,最后加入4g/100mL氢氧化钠溶液4mL,蒸馏水定容,放置15min,测定510nm波长处吸光度。以芦丁质量浓度(mg/mL)为横坐标,吸光

度( $A_{510\text{nm}}$ )为纵坐标绘制标准曲线,得到线性回归方程:  $y = 12.324x + 0.0114 (R^2 = 0.9997)$ 。

将各样品稀释适当的倍数,配成样品溶液,准确吸取各样品溶液1mL,置于10mL容量瓶中,按上述方法分别测定吸光度( $A$ ),代入回归方程计算样品中的总黄酮含量。

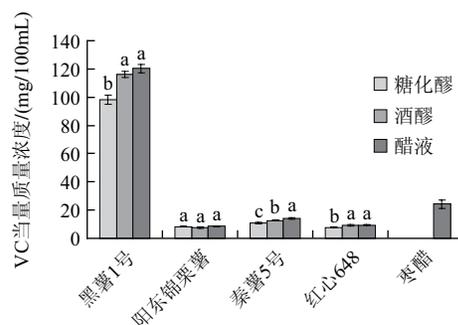
### 1.3.8 数据分析

每个样品做3个平行实验,取其平均值,结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示,使用DPS v7.05软件进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 DPPH自由基清除能力的比较

DPPH是一种稳定的自由基,可溶于甲醇等有机溶剂呈紫色<sup>[20]</sup>,在波长517nm处有最大光吸收度。当有自由基清除剂存在时,其颜色减退,褪色程度与清除能力呈定量关系。因此可通过分光光度法进行定量分析,从而评价抗氧化物质的抗氧化能力<sup>[13]</sup>。



小写字母不同表示同一品种不同发酵阶段产物清除DPPH自由基能力差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图1 各样品发酵过程中清除DPPH自由基能力变化

Fig.1 DPPH scavenging activity of each sample during fermentation process

由图1可知,各样品的DPPH自由基清除能力在品种间差异很大,紫甘薯(黑薯1号)发酵产物的清除能力约为其他3种甘薯的8~9倍。李红蕊<sup>[21]</sup>研究表明,枣醋具有较强的DPPH自由基清除能力,且清除能力高于苦荞醋、柿子醋等,而黑薯1号发酵产物的清除能力约为枣醋的4倍,由此可以看出黑薯1号发酵产物具有很强的抗氧化活性,这可能是由于其含有丰富的花色苷、绿原酸、异绿原酸等功能成分<sup>[22]</sup>。各样品的DPPH自由基清除能力依次为:黑薯1号>枣醋>秦薯5号>红心648>阳东锦栗薯。对黑薯1号醋酿制过程中不同发酵阶段产物进行比较,可以看出,酒精发酵及醋酸发酵使其DPPH自由基清除能力显著提高。

VC当量质量浓度分别为:糖化醪(98.30 $\pm$ 3.34)mg/100mL、酒醪(116.09 $\pm$ 1.94)mg/100mL、醋液(120.23 $\pm$ 3.17)mg/100mL;这可能是由于甘薯醋在酿制过程中发生了复杂的物质变

化, 酚类物质的组成、结构及含量可能因发酵状态而发生改变, 而结构不同的酚类物质对抗氧化能力的贡献也不尽相同<sup>[23]</sup>。阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648的糖化醪、酒醪、醋液清除能力也有一定变化, 其中, 秦薯5号、红心638的酒醪及醋液较之糖化醪清除能力有显著提高, 阳东锦栗薯不同发酵阶段产物清除能力无显著差异。

### 2.2 ABTS<sup>+</sup>·清除能力的比较

ABTS与一定浓度的过硫酸钾避光反应12~16h, 经活性氧化后生成稳定的蓝绿色阳离子自由基, 抗氧化物质与ABTS<sup>+</sup>·反应后使其反应体系褪色, 吸光度降低, 降低越显著则表明被测物质的抗氧化能力越强<sup>[24]</sup>。

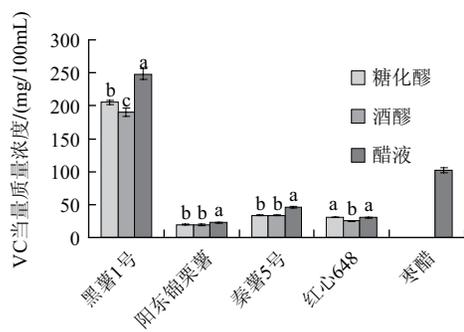


图2 各样品发酵过程中清除ABTS<sup>+</sup>·能力变化  
Fig.2 ABTS scavenging activity of each sample during fermentation process

由图2可知, ABTS<sup>+</sup>·清除能力在品种间存在较大差异, 黑薯1号发酵产物远高于阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648及枣醋, 与DPPH自由基清除能力趋势一致。对同一品种不同发酵阶段产物的清除能力进行比较, 可以看出, 黑薯1号醋液的ABTS<sup>+</sup>·清除能力较之糖化醪、酒醪显著升高, VC当量质量浓度分别为: 糖化醪(205.28±3.07)mg/100mL、酒醪(190.26±5.87)mg/100mL、醋液(247.80±8.36)mg/100mL, 这可能是由于醋酸发酵过程中总多酚含量升高, 且有些物质发生转化, 生成具有较强抗氧化活性的成分。阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648醋液的ABTS<sup>+</sup>·清除能力也有显著的提高。

### 2.3 Fe<sup>3+</sup>还原能力的比较

Fe<sup>3+</sup>还原能力的测定也是用来评价物质抗氧化能力的常用方法之一。待测物中的还原性物质与铁氰化钾反应生成亚铁氰化钾, 再与Fe<sup>3+</sup>生成普鲁士蓝<sup>[25]</sup>。因此可通过比色法来进行定量分析, 吸光度越大, 还原能力越强。

由图3可知, 各个样品Fe<sup>3+</sup>还原能力存在品种间差异, 黑薯1号发酵产物远高于其他3个品种甘薯以及枣醋, 还原能力大小依次为: 黑薯1号>枣醋>秦薯5号>红心648>阳东锦栗薯, 表现出与清除DPPH自由基和清除ABTS<sup>+</sup>·相似的趋势。黑薯1号糖化醪、酒醪、醋液的Fe<sup>3+</sup>还原能力

均存在显著性差异, VC当量质量浓度分别为: 糖化醪(156.03±4.96)mg/100mL、酒醪(177.97±4.42)mg/100mL、醋液(220.46±6.03)mg/100mL, 这可能与其花色苷及多酚类物质含量在发酵过程中的变化有关, 且花色苷、VC、类胡萝卜素等活性成分与酚类物质的协同作用可能使其还原能力有所提高<sup>[26]</sup>。阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648的糖化醪、酒醪、醋液的Fe<sup>3+</sup>还原能力也有不同程度的变化, 其醋液较之糖化醪、酒醪的还原能力均有显著提高。

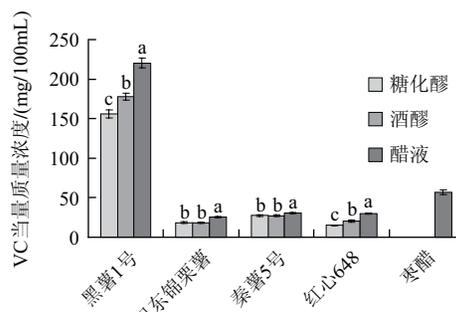


图3 各样品发酵过程中Fe<sup>3+</sup>还原能力变化  
Fig.3 Reducing power of each sample during fermentation process

### 2.4 花色苷、总酚、总黄酮含量比较及相关性分析

#### 2.4.1 花色苷含量

紫甘薯花色苷属于多酚类物质, 它具有消除活性氧、清除自由基等抗氧化作用<sup>[27]</sup>。对紫甘薯(黑薯1号)不同发酵阶段产物花色苷含量进行测定, 得其含量分别为: 糖化醪(183.82±8.07)mg/L、酒醪(184.25±11.03)mg/L、醋液(178.90±18.39)mg/L。紫甘薯酒精发酵、醋酸发酵前后花色苷含量无显著差异(P>0.05)。

#### 2.4.2 总酚、总黄酮含量比较

表1 各样品发酵过程中总酚及黄酮含量的变化  
Table 1 Total polyphenols and total flavonoids contents in each sample during fermentation process

样品	总酚含量/(mg/100mL)	总黄酮含量/(mg/100mL)
黑薯1号	糖化醪 197.97±4.81 <sup>b</sup>	256.63±6.51 <sup>a</sup>
	酒醪 185.12±5.46 <sup>c</sup>	180.04±3.60 <sup>b</sup>
	醋液 214.56±5.07 <sup>a</sup>	168.78±3.81 <sup>b</sup>
阳东锦栗薯	糖化醪 30.96±1.24 <sup>b</sup>	11.12±0.82 <sup>a</sup>
	酒醪 28.59±1.09 <sup>c</sup>	11.61±0.93 <sup>a</sup>
	醋液 33.90±1.13 <sup>a</sup>	9.63±1.03 <sup>a</sup>
秦薯5号	糖化醪 44.08±1.58 <sup>b</sup>	16.42±0.74 <sup>b</sup>
	酒醪 40.46±2.91 <sup>b</sup>	23.92±0.84 <sup>a</sup>
	醋液 55.46±1.65 <sup>a</sup>	14.72±1.00 <sup>b</sup>
红心648	糖化醪 34.73±1.32 <sup>b</sup>	15.12±0.69 <sup>a</sup>
	酒醪 32.73±2.15 <sup>b</sup>	12.82±1.19 <sup>b</sup>
	醋液 42.20±1.48 <sup>a</sup>	11.01±0.86 <sup>b</sup>
枣醋	105.50±1.83	31.40±2.94

注: 不同小写字母表示同一品种不同发酵阶段产物多酚、黄酮含量的差异显著(P<0.05)。

由表1可知,不同品种及不同发酵阶段甘薯的总酚及总黄酮含量存在较大差异。其中黑薯1号的总酚及总黄酮含量远高于阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648及枣醋,从高到低依次为黑薯1号、枣醋、秦薯5号、红心648、阳东锦栗薯,与样品抗氧化活性变化趋势相一致;其次,甘薯醋酿制过程中,发酵状态对总酚、总黄酮含量也有不同程度的影响。酒精发酵后,可能由于发酵过程中多酚及黄酮类物质发生了氧化、聚合、沉淀等反应<sup>[28]</sup>,黑薯1号发酵产物的总酚含量及黄酮含量均有下降;醋酸发酵使其总酚含量略有升高,可能是因为醋酸菌等微生物代谢产生了一些多酚类物质<sup>[29]</sup>;黑薯1号醋液的总黄酮含量较之糖化醪有所降低,这可能是由于发酵过程中黄酮类物质因光照及空气作用发生不同程度的分解;其次,pH值、金属离子也会对黄酮含量有一定的影响。阳东锦栗薯、秦薯5号、红心648不同发酵阶段产物的多酚和黄酮含量都有一定程度变化,醋液的多酚含量均显著升高,红心648醋液黄酮含量较之糖化醪显著下降,阳东锦栗薯、秦薯5号醋液较之糖化醪均无显著变化。

#### 2.4.3 总酚、总黄酮含量与样品抗氧化能力相关性分析

将3种抗氧化能力评价方法下得到的VC当量质量浓度(VCEAC)分别与总酚含量、总黄酮含量作相关性分析,结果如表2所示。样品的总多酚、总黄酮含量与其DPPH自由基和ABTS<sup>+</sup>·清除能力、Fe<sup>3+</sup>还原能力呈极显著相关( $P < 0.01$ ),说明多酚类物质、黄酮类物质对其抗氧化能力有显著影响。

表2 样品抗氧化能力与总多酚及总黄酮含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between antioxidant activity and total polyphenols or total flavonoids contents

指标	DPPH自由基清除能力	ABTS <sup>+</sup> ·清除能力	Fe <sup>3+</sup> 还原能力
总酚含量	0.9756**	0.9972**	0.9791**
总黄酮含量	0.9412**	0.9285**	0.9143**

注: \*\*. 相关性极显著( $P < 0.01$ )。

### 3 结论与讨论

本研究比较了紫甘薯(黑薯1号)与黄心甘薯(阳东锦栗薯)、白心甘薯(秦薯5号)、橘黄心甘薯(红心648)不同发酵阶段产物(醋液及其糖化醪、酒醪)的抗氧化活性,并且与枣醋做了对比。研究结果表明:4种甘薯的发酵产物都有较强的DPPH自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>·清除能力和Fe<sup>3+</sup>还原能力,抗氧化能力大小依次为黑薯1号>秦薯5号>红心648>阳东锦栗薯;其中,黑薯1号抗氧化能力高出另外3种甘薯4~9倍。实验证明,黑薯1号不同发酵阶段产物含有大量花色苷,而花色苷是清除自由基的主要活性物质<sup>[23]</sup>,这可能是黑薯1号抗氧化能力远高于其他3个品种甘薯的主要原因。

实验表明,紫甘薯醋的抗氧化能力高于枣醋,其DPPH自由基清除能力和Fe<sup>3+</sup>还原能力约为枣醋的4倍,ABTS<sup>+</sup>·清除能力约为枣醋的2倍。经过酒精发酵、醋酸发酵,紫甘薯发酵产物的抗氧化能力有不同程度的提高,其酒醪及醋液的DPPH自由基清除能力显著高于糖化醪,ABTS<sup>+</sup>·清除能力大小依次为醋液>糖化醪>酒醪,Fe<sup>3+</sup>还原能力从高到低依次为醋液>酒醪>糖化醪,由此可以看出,经过醋酸发酵,紫甘薯醋的抗氧化能力有所升高。酒精发酵及醋酸发酵并未对花色苷含量造成显著影响,但是醋液的总多酚含量显著升高,且发酵过程中,多酚类物质及黄酮类物质可能会发生复杂的物质及结构变化,这可能是引起醋液抗氧化能力升高的主要原因,但要确定具体的变化形式以及多酚和黄酮中的哪些成分、哪些结构起到主要的抗氧化作用,还需要进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 陈杰,李进伟,张连富.紫甘薯色素的提取及稳定性研究[J].食品科学,2011,32(18):154-158.
- [2] 张明晶.紫心甘薯的研究进展与综合开发利用[J].中国食物与营养,2006(4):19-21.
- [3] 温桃勇,刘小强.紫色甘薯营养成分和药用价值研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(5):1954-1956.
- [4] 須田郁夫.健康機能性を活用した甘しょと大豆の高付加価値化[J].九州農業研究,2001(63):29-34.
- [5] SAIGUSA N, TERAHARA N, OHBA R. Evaluation of DPPH-radical-scavenging activity and antimutagenicity and analysis of anthocyanins in an alcoholic fermented beverage produced from cooked or raw purple-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* cv. *Ayamurasaki*) roots [J]. Food Science and Technology Research, 2005, 11(4): 390-394.
- [6] SASKI Y, OHBA R. Antioxidant activity and optimal manufacturing conditions of purple sweet potato lactic acid bacteria drink[J]. Food Science and Technology Research, 2004, 10(4): 447-452.
- [7] TERAHARA N, MATSUI T, FUKUI K, et al. Caffeoylsophorose, a new natural  $\alpha$ -glucosidase inhibitor, from red vinegar by fermented purple-fleshed sweet potato[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(11): 2239-2246.
- [8] 須田郁夫,古田收,西場洋一,等.紫甘しょジュース飲用ラットにおける肝障害軽減効果[J].九州農業研究,1997(59):25.
- [9] 王杉,邓泽元,曹树稳,等.紫薯色素对老龄小鼠抗氧化功能的改善作用[J].营养学报,2005,25(3):245-248.
- [10] 楚文靖,滕建文,夏宁,等.紫甘薯酒抗氧化活性的研究[J].酿酒科技,2007(12):43-46.
- [11] TERAHARA N, MATSUI T, FUKUI K, et al. Caffeoylsophorose in a red vinegar produced through fermentation with purple sweet potato[J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(9): 2539-2543.
- [12] 李志西,刘耀玺,张莉.一种果醋发酵罐:中国,ZL200610105161.2[P].2007-08-22.
- [13] 金杰,张锋.桑椹醋及不同食醋对二苯代苦味酰基自由基(DPPH·)清除作用的研究[J].中国调味品,2011,36(10):42-47.
- [14] 叶挺祥.丹酚酸B对血管内皮细胞NO合成的影响[D].天津:天津大学,2006.
- [15] 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.
- [16] OYAIZU M. Studies on product of browning reaction prepared from glucose amine[J]. Japanese Journal of Nutrition, 1986, 44: 307-315.
- [17] 霍琳琳, 苏平, 吕英华. 分光光度法测定桑葚总花色苷含量的研究[J]. 酿酒, 2005, 32(4): 88-89.
- [18] CAI Yizhong, LUO Qiong, SUN Mei, et al. Antioxidant activity and phenolic compounds of traditional Chinese medicinal plants associated with anticancer[J]. Life Sciences, 2004, 74(17): 2157-2184.
- [19] 李利华. 柑橘皮中总黄酮的含量测定及体外自由基清除作用研究[J]. 西北药学杂志, 2009, 24(5): 261-263.
- [20] DUDONNÉ S, VITRAC X, COUTIÈRE P, et al. Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC assays[J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(5): 1768-1774.
- [21] 李红蕊. 枣醋及其功能性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [22] 彭强, 高彦祥, 袁芳. 紫甘薯及其花色苷的研究与开发进展[J]. 食品科学, 2010, 31(23): 401-405.
- [23] 楚文靖. 紫甘薯酒的加工和抗氧化活性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- [24] 朱玉昌, 焦必宁. ABTS法体外测定果蔬类总抗氧化能力的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(8): 77-80.
- [25] SIDDHURAJU P, MOBAN P S, BECKER K. Studies on the antioxidant activity of Indian Laburnum (*Cassia fistula* L.): a preliminary assessment of crude extracts from stem bark, leaves, flowers and fruit pulp[J]. Food Chemistry, 2002, 79: 61-67.
- [26] 盛雪飞, 彭燕, 陈健初. 天然抗氧化剂之间的协同作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2010, 31(7): 414-421.
- [27] 凌关庭. 抗氧化食品与健康[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 245-249.
- [28] 洪玉涛, 余晓斌, 查勇. 松针饮料酒发酵前后抗氧化能力的研究[J]. 酿酒科技, 2006(10): 31-33.
- [29] 郑淑彦, 向进乐, 李志西. 枳椇醋发酵阶段产物的抗氧化活性变化[J]. 食品科学, 2011, 32(7): 113-116.