

贮藏中香椿多酚抗氧化性的变化研究

杜 健 杨 颖 赵明烨 王 军 陈 敏

(中国农业大学食品科学与营养工程学院)

摘要:通过香椿多酚在贮藏过程中抗氧化性的变化,探究贮藏条件对香椿中功能性质的影响。将香椿在 0、5、10 ℃ 的温度下分别贮藏一定时间后,采用 DPPH 自由基清除法(DPPH 法)和铁离子还原比色法(FRAP 法)来评价其多酚抗氧化性的变化,同时用高效液相色谱法(HPLC 法)测定样品中多酚的变化。贮藏后的香椿,其多酚的抗氧化性均在第 4 天时达到最高,且该变化与香椿中主要的 3 种多酚化合物的含量变化有关。贮藏温度、时间对于香椿多酚抗氧化活性的变化有着一定的影响,香椿的抗氧化性主要取决于酚酸类物质的变化。

关键词: 香椿; 多酚; 抗氧化性; 贮藏

中图分类号: TS201.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)02-0120-06

DU Jian; YANG Ying; ZHAO Ming-ye; WANG Jun; CHEN Min. **Changes of antioxidant activity of phenolics in *Toona sinensis* during storage.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33 (2) 120-125 [Ch, 22 ref.] College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083, P. R. China.

The purpose of this study is to investigate the effect of storage conditions on the function of *Toona sinensis* by studying the changes of antioxidant activity of phenolics. DPPH assay and ferric reducing antioxidant power (FRAP) were used to evaluate the changes of antioxidant activity during the storage at 0, 5 and 10 ℃. The content of various phenolic compounds was detected by HPLC. The antioxidant activity of phenolics in *T. sinensis* stored at 0, 5 and 10 ℃ reached the highest value at the 4th day and the change could be connected with the changes of three kinds of phenolics in it. So the antioxidant activity of phenolics is affected by both storage temperature and time, and mainly decided by the changes of phenolics in *T. sinensis*.

Key words *Toona sinensis*; phenolics; antioxidant activity; storage

香椿 (*Toona sinensis*) 为楝科香椿属多年生落叶乔木,因其嫩芽有特殊香气而得名。香椿的嫩茎、叶供食用,是为数不多的木本蔬菜之一^[1]。现代医学研究已经发现香椿中有黄酮、皂甙、萜类等多种活性成分,其中酚类物质是其主要活性成分^[2],具有抑制癌细胞增生^[3],预防冠心病、高血压、肿瘤等^[4]功效。

香椿在贮藏过程中会发生褐变,有研究表明引起果蔬酶促褐变反应的主要底物是酚类物质^[5-7]。郁志芳等^[8]发现香椿中的结合酚及游离酚含量在贮藏过程中发生了一定的变化,同时多酚是植物抗氧化能力的主要贡献物质^[9-10]。因此,贮藏条件的

改变可使多酚的抗氧化性产生一定变化,从而影响香椿的功能活性。香椿在不同贮藏条件下其抗氧化性如何变化,还未见相关报道。

抗氧化活性的测定方法有许多种,如 DPPH 法、TEAC 法、ORAC 法、TRAP 法和 FRAP 法等^[11-12]。为获得确切的评价结论,需要用 2 种或 2 种以上的方法评定样品的抗氧化活性^[13]。本文采用的 DPPH 自由基清除法(DPPH 法)和铁离子还原比色法(FRAP 法)操作简便,易于标准化,适用于大量样品的测定,而且结果重现性较好,因而广泛用于测定各种抗氧化剂、食品、生物样品等的抗氧化活性^[14-16],是测定多酚抗氧化活性最常用的 2 种方

收稿日期: 2010-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(30771510)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009211)。

第一作者: 杜健。主要研究方向: 天然产物化学。电话: 010-62737650 Email: djotyne@yahoo.cn 地址: 100083 北京市清华东路 17 号中国农业大学食品科学与营养工程学院。

责任作者: 陈敏, 教授。主要研究方向: 天然产物化学。电话: 010-62737650 Email: minch19@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

法^[15]。

目前对于多酚抗氧化性的讨论多与总酚变化相联系,本研究中采用了高效液相色谱法(HPLC法),检测贮藏中变化最大的多酚组分,探究多酚抗氧化活性与多酚主要组分含量变化之间的关系,以深入探讨香椿抗氧化性的变化原因。

1 材料与方法

1.1 实验材料

香椿采自北京市门头沟区。选用新鲜、完整的嫩香椿作为试材。

1.2 实验试剂及仪器

实验试剂:DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼,分析纯,SIGMA-ALDRICH),TPTZ(三吡啶三吡嗪,分析纯,ACROS-ORGANICS),正己烷、乙酸乙酯、无水乙醇、FeSO₄·BHT(2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚)、NaAc·3H₂O、FeCl₃均为国产分析纯试剂。

实验仪器:旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂)、722型可见分光光度计(上海恒平科学仪器有限公司)、JY92-IIN超声波细胞破碎仪(宁波新艺超声设备有限公司)、PWC-214分析天平(艾德姆衡器有限公司)、MA30水分测定仪(德国赛多利斯SARTORIUS)、HH·SY11-N1型水浴锅(北京市长风仪器仪表公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将香椿放在筐中,套上0.03 mm厚的黑色聚乙烯薄膜袋,分别置于0、5、10℃的冷库中,于85%~95%相对湿度下挽口贮藏。贮藏于0℃下的香椿变化极慢,实验中在第2、4、8、14、22天取样,第22天时腐败严重,无法继续贮藏;贮藏于5、10℃下的香椿分别到第14天和第11天时严重腐败,分别于第2、4、8、12、14天以及第2、4、6、8、11天时取样。样品叶茎分离后,将香椿叶用避光密封袋真空密封,液氮速冻后立刻置于-40℃冰箱中存放。

1.3.2 香椿多酚的提取

取出贮存于-40℃冰箱中的香椿样品,迅速加入液氮后研磨至粉末状,平行称取3组样品,并测定水分含量,本文中的香椿多酚含量均以干质量计量。

每份称6.00 g香椿粉末,按料液比1:30,每次加入30 mL 50%乙醇并用细胞破碎仪超声提取3 min,过滤并收集滤液,重复6次,合并滤液,于40℃下旋转蒸发除去乙醇;将浓缩液用90 mL正己烷脱脂(每次30 mL,脱脂3次);再用90 mL乙酸乙酯/无水乙醚(体积比为1:1)萃取香椿多酚,收集上层的有机层(每次30 mL,重复操作3次);乙酸乙酯/

无水乙醚相用无水硫酸钠干燥,将合并的乙酸乙酯/无水乙醚相于30℃下旋干,用50%乙醇定容。由此制备得到香椿多酚提取液的平行样1号、2号、3号,用于抗氧化性的测定和高效液相色谱测定。

1.3.3 DPPH 自由基清除法(DPPH法)

香椿多酚提取液的DPPH自由基清除测定是在张丽平等^[17]总结的方法上加以改进而得。分别在试管中加入50 μL不同浓度梯度的样液,1.0 mL的无水甲醇,1.0 mL、200 μmol(即79 μg/mL)的DPPH甲醇溶液,混匀作为实验组,在室温下避光放置,在517 nm下从0 min开始,每隔10 min测定反应液的吸光值直至60 min;对照组采用无水甲醇替代样液,其他操作同上;空白为无水甲醇。该反应的测定指标为吸光值,用半数抑制浓度值(IC₅₀)评价样品对DPPH自由基的清除能力。IC₅₀值指的是将原始DPPH甲醇溶液的浓度降低50%时所需的抗氧化剂(样品)的浓度。清除率越高,IC₅₀值越小,其所对应的样品清除DPPH自由基的能力越强,抗氧化活性越高。

DPPH 自由基的清除率表示为:

$$\text{清除率} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\%$$

式中:A₁为对照组的吸光值,A₂为加入样液的实验组的吸光值。

1.3.4 铁离子还原比色法(FRAP法)

FRAP法是测定抗氧化剂还原铁离子的能力。其原理为Fe³⁺-TPTZ可被样品中的抗氧化剂还原为Fe²⁺-TPTZ而呈蓝色,并于593 nm处有最大吸光度,以1.0 mmol/L FeSO₄为标准,依此可计算出样品抗氧化活性^[15]。

香椿多酚提取液的FRAP法测定参照Benzie等^[18]方法。将10 mmol/L的TPTZ、20 mmol/L的FeCl₃·6H₂O与pH 3.6的0.3 mol/L醋酸缓冲液以1:1:10的体积比混合得到FRAP鲜液,置于37℃水浴中保温。取3 600 μL的FRAP鲜液与360 μL去离子水、120 μL适当浓度的香椿多酚提取液(用50%乙醇溶液稀释)充分混合,在593 nm下从0 min开始,每隔10 min测定反应液的吸光值直至60 min。空白采用120 μL去离子水代替样品。该反应的测定指标为吸光值。以能够还原得到1 mol/L Fe²⁺所需的抗氧化剂(样品)的量来评价样品铁还原能力的强弱,所需的样品量越少其抗氧化活性越高。

绘制Fe²⁺-TPTZ标准曲线,得到 $y = 0.0006x - 0.0004$ ($R^2 = 0.9999$),由此计算得到在593 nm下,含有1 mol/L Fe²⁺的反应液的吸光值应为

0.599 6, 以此作为参照评价多酚样品的铁还原能力。

1.3.5 高效液相色谱法测定香椿多酚的组分

通过 Yang 等^[19]建立的液质联用方法, 鉴定香椿多酚的组成并得到高效液相谱图, 分离得到了没食子酸、没食子酸乙酯、五没食子酸葡萄糖酯(5GG)、六没食子酸葡萄糖酯(6GG)、七没食子酸葡萄糖酯(7GG)、槲皮素-3-O-葡萄糖苷、槲皮素-3-O-鼠李糖苷、山奈酚-3-O-鼠李糖苷这 8 种主要的香椿多酚组分, 其中没食子酸衍生物包括没食子酸乙酯、5GG、6GG、7GG。

2 结果与讨论

2.1 香椿多酚清除 DPPH 自由基能力的动力学特性

DPPH 是一种稳定的自由基, 其稳定性源自苯环的共轭和位阻及硝基的吸电子作用, 它在 517 nm 处有较强的吸光值, 当有自由基清除剂存在时, 可与其单电子配对而使吸光值降低。植物多酚对稳定自由基 DPPH 的清除作用在于多酚可以捕获 DPPH 自由基, 然后发生竞争反应, 最主要的是多酚形成更稳定的自由基, 这些自由基之间可以偶合, 形成聚合的多酚分子; 相对而言, 多酚自由基继续引发自由基链反应的趋势要弱得多^[15, 20]。

按照 1.3.3 方法, 测定不同浓度下的香椿多酚提取液与 DPPH 自由基作用所产生的吸光值在 0 ~ 60 min 内的变化, 并由此得到多酚清除自由基能力的动力曲线图, 如图 1 所示。

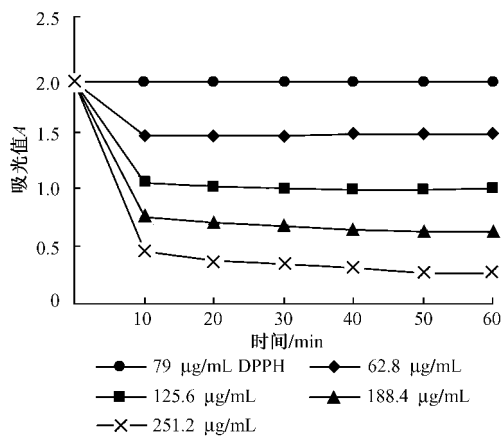


图1 不同浓度的香椿多酚对 DPPH 自由基的清除能力

Fig.1 Scavenging effects of different concentrations of phenolics in *T. sinensis* on DPPH radicals

从图 1 可见, 在 60 min 内, DPPH 这种稳定的自由基在甲醇溶液中几乎不发生变化(最上面一条线), 因此溶剂不会对实验造成干扰。同时图 1 表明, 香椿多酚提取液清除 DPPH 自由基动力学反应

模式表现为浓度及反应时间的双重依赖关系。香椿多酚的含量越高, 对 DPPH 自由基的清除能力越强, 在反应的第 10 分钟时, 香椿提取液浓度每增加 62.8 $\mu\text{g/mL}$, 清除率可提高 15% 左右。不同浓度的多酚对于 DPPH 的清除能力随时间的变化呈现一致的趋势, 在反应的前 10 min 内, 吸光值迅速下降, 之后逐渐趋于平缓, 反应达到稳态大约需要 50 min, 在 60 min 时吸光值稳定不变, 此时多酚已最大程度地提供质子, 与 DPPH 自由基反应, 故可将反应 60 min 时的吸光值作为反应终点计算清除率。

将香椿多酚提取液配制成 62.8、125.6、188.4、251.2 $\mu\text{g/mL}$ 4 个浓度梯度, 按照 1.3.3 方法计算得到该组多酚对 DPPH 的清除率依次为 23.33%、49.46%、67.72%、85.77%, 从而可算出清除 50% DPPH 自由基所需的多酚浓度为 137.55 $\mu\text{g/mL}$ 。以抗氧化剂 BHT 标准品作为参照, 配制成 182.926 8、365.853 7、548.780 5、731.707 3 $\mu\text{g/mL}$ 4 个浓度梯度的标准液进行清除 DPPH 自由基的实验, 计算得到 BHT 的 IC_{50} 值为 478.00 $\mu\text{g/mL}$ 。

从图 2 中可以看出, 不同浓度的香椿多酚及 BHT 与 DPPH 自由基清除率之间均有较强的线性相关性, 香椿多酚与 BHT 相比具有更大的斜率, 同样清除 50% DPPH 自由基所需要的香椿多酚含量仅为所需 BHT 含量的 29%。

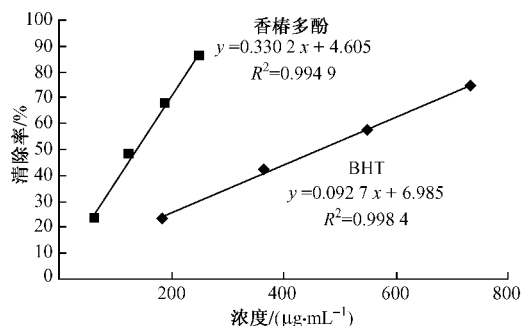


图2 香椿多酚及参比物 BHT 与 DPPH 自由基清除率的相关性

Fig.2 Correlations between different concentrations of phenolics and the scavenging on DPPH radicals

2.2 香椿多酚铁离子还原能力的动力学特性

香椿多酚具有一定的还原能力, 可将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} , Fe^{2+} -TPTZ 络合物在 593 nm 下的吸光值大小可反映出香椿多酚还原力的强弱, 吸光值越高, 样品还原铁离子的能力越强, 其抗氧化活性越高。按照 1.3.4 方法, 测定不同浓度下的香椿多酚将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} 生成的 Fe^{2+} -TPTZ 络合物在 0 ~ 60 min 内的吸光值变化, 由此得到多酚还原铁离子能力的动力曲线图, 如图 3 所示。

从图 3 中可看出, 香椿多酚提取液还原铁离子

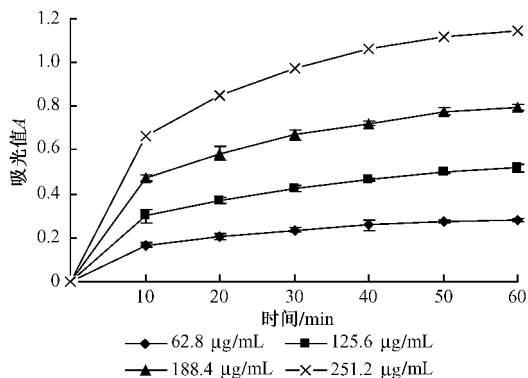


图3 不同浓度的香椿多酚还原铁离子的动力曲线

Fig. 3 Reaction kinetics of different concentrations of phenolics extracted with FRAP assay

动力学反应模式表现为浓度及反应时间的双重依赖关系。即反应液中香椿多酚含量越高,还原铁离子能力越强;反应时间越长,香椿多酚还原铁离子能力越强,在反应的前10 min内,香椿多酚提取液还原铁离子的速率激增。据 Xiong 等^[14]报道,FRAP 方法中的反应持续进行到200 min 后方达到稳态;冯卫华^[21]研究表明,反应50 min 后吸光值增加非常缓慢,已有达稳态时的80%的铁离子被还原,反应50 min 以上基本可视为达到稳态。本研究表明,反应60 min 时基本达到稳态,故选择反应60 min 时的吸光值作为终止点,用于评价样品的铁离子还原能力。

反应60 min 时的吸光值与香椿多酚浓度之间的相关性如图4所示,当香椿多酚浓度为137.525 $\mu\text{g/mL}$ ($A=0.5996$) 时,可还原得到1 mol Fe^{2+} 。图4还给出了以抗坏血酸(Vc)作为标准品,配制成110.294 1、220.588 2、330.882 4、441.176 5 $\mu\text{g/mL}$ 4个浓度梯度的标准液进行铁离子还原实验,得到吸光值与Vc标准液浓度之间的关系,即还原得到1 mol/L Fe^{2+} 所需的Vc浓度为232.94 $\mu\text{g/mL}$ 。

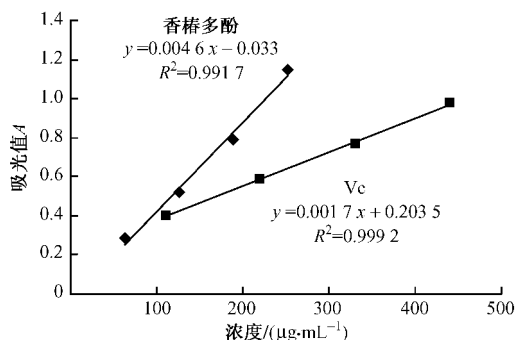


图4 香椿多酚及参比物Vc与还原铁离子能力的相关性

Fig. 4 Correlations between phenolics and Vc on the ferric reducing

由此可见,不同浓度的香椿多酚及Vc与 Fe^{2+} 吸光值之间均有较强的线性相关性,香椿多酚具有

更大的斜率。137.525 $\mu\text{g/mL}$ 香椿多酚与232.94 $\mu\text{g/mL}$ 的抗坏血酸具有相同的还原力,多酚对铁离子的还原能力比抗坏血酸的还原力高出41%。

2.3 贮藏中香椿多酚抗氧化性的变化

多酚是植物抗氧化能力的主要贡献物质^[9-10], Wang 等^[22]研究特别指出,没食子酸及其衍生物具有很强的抗氧化性,本实验室的前期研究表明没食子酸及其衍生物为香椿多酚的主要组分,因此香椿的抗氧化性可能主要取决于这些酚酸类物质。

2.3.1 DPPH 自由基清除法评价贮藏多酚的抗氧化性变化

将经过1.3.1处理的香椿贮藏样品按照1.3.2的方法进行提取,制备得到的多酚提取液分别用50%乙醇稀释20、40、80、160倍后,按照1.3.3的方法测定不同浓度梯度的香椿多酚对DPPH自由基的清除能力,并计算出 IC_{50} 值,得到不同贮藏条件下香椿多酚与DPPH自由基清除能力的关系图,如图5所示。

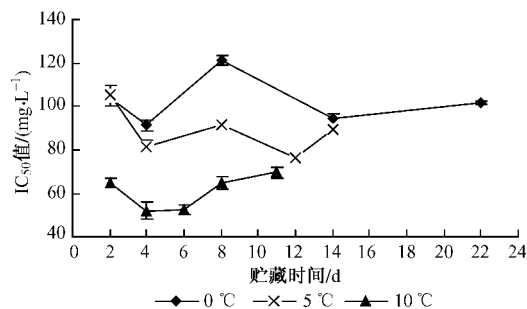


图5 香椿多酚清除DPPH自由基能力与贮藏条件的关系

Fig. 5 Correlations between the DPPH reducing ability of phenolics and the different storage conditions

图5显示的是香椿在温度分别为0、5、10 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏期间其多酚对DPPH自由基清除能力的变化。随着贮藏时间的延长,清除50% DPPH 自由基所需的香椿多酚量基本上为先减少后增多,即抗氧化性呈现先增强后减弱的趋势。

本实验室在前期研究中,按照1.3.5的方法检测了香椿在不同贮藏条件下8种主要多酚组分,通过归一化数据处理,从各个色谱峰的面积积分值得到了贮藏过程中香椿多酚主要组分的变化趋势。

分析贮藏过程中8种主要多酚的含量变化与清除DPPH自由基能力之间的关系,得知其中3种酚酸葡萄糖酯(5GG、6GG、7GG)的含量变化最为显著,且与清除DPPH自由基的能力有一定的相关性,如图6所示。其中0 $^{\circ}\text{C}$ 第4天时贮藏样中的多酚对DPPH自由基的清除能力最强,同时3种酚酸类物质含量也均在第4天时达到最高。5 $^{\circ}\text{C}$ 时,6GG、7GG在第4及12天时含量较高,相应的对DPPH自

由基的清除率也在第4、12天时较强。10℃下贮藏的香椿多酚清除 DPPH 自由基的能力在第4和5天

时达到最高,相应的 5GG、6GG 及 7GG 的含量均在第4、5天时较高。

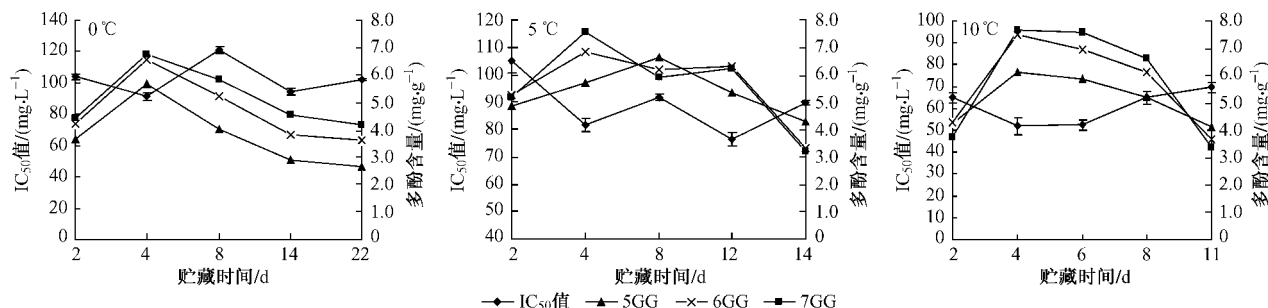


图6 不同贮藏条件下香椿多酚清除 DPPH 自由基能力与没食子酸衍生物含量变化的关系

Fig. 6 Correlations between the DPPH reducing ability of phenolics and the content of gallic acid derivant

综上所述,没食子酸衍生物对于 DPPH 自由基的清除具有很大的贡献,由于没食子酸及其衍生物具有很强的抗氧化性,故此时抗氧化性的增高源于几种没食子酸衍生物含量的增加。

2.3.2 FRAP 法评价贮藏多酚的抗氧化性变化

将贮藏样品提取、稀释后,按照 1.3.4 方法测定贮藏样品中的多酚对铁离子的还原能力,并计算出还原得到 1 mol Fe²⁺ 所需的多酚含量,图 7 为香椿多酚对铁离子的还原能力与不同贮藏条件的关系。

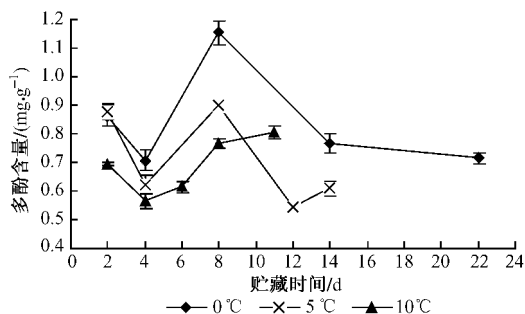


图7 香椿多酚还原铁离子能力与贮藏条件的关系

Fig. 7 Correlations between the ferric reducing ability of phenolics and the different storage conditions

图 7 为香椿经 0、5、10℃ 贮藏后其多酚还原 Fe³⁺ 能力的变化,还原得到 1 mol Fe²⁺ 所需多酚的含量呈现先减少后增多的趋势,即贮藏样品的还原

力先增高后降低,基本与清除 DPPH 自由基的趋势一致。

按照 1.3.5 的方法分离并经过液相归一化数据处理后,得到香椿多酚还原铁离子的能力与 5GG、6GG、7GG 这 3 种酚酸葡萄糖酯类物质的含量变化有一定相关性。其中 0℃ 下贮藏的香椿多酚在第 4 天时具有较高的还原力,相应的 5GG、6GG 和 7GG 的含量均第 4 天时达到最高。5℃ 下第 4 和 12 天时 6GG、7GG 的含量较高,使得此时多酚还原铁离子的能力相对较强。10℃ 下第 4 天时多酚还原铁离子能力最强,此时 5GG、6GG 及 7GG 的含量也在第 4 天时最高(图 8)。

综上所述,经贮藏后的没食子酸衍生物含量越高,相应的贮藏样品中多酚所表现出的还原力越强,与 DPPH 方法得到的结论相符,进一步证明香椿的抗氧化性主要决定于这些酚酸类物质。

3 结 论

香椿在贮藏过程中会发生褐变,贮藏条件的改变使多酚的组分含量发生了改变,从而对其抗氧化性产生一定的影响。本实验室的前期研究表明没食子酸及其衍生物为香椿多酚的主要组分,由于没食子酸及其衍生物具有很强的抗氧化性^[22],本文主要关注其含量的变化与多酚抗氧化性之间的联系。

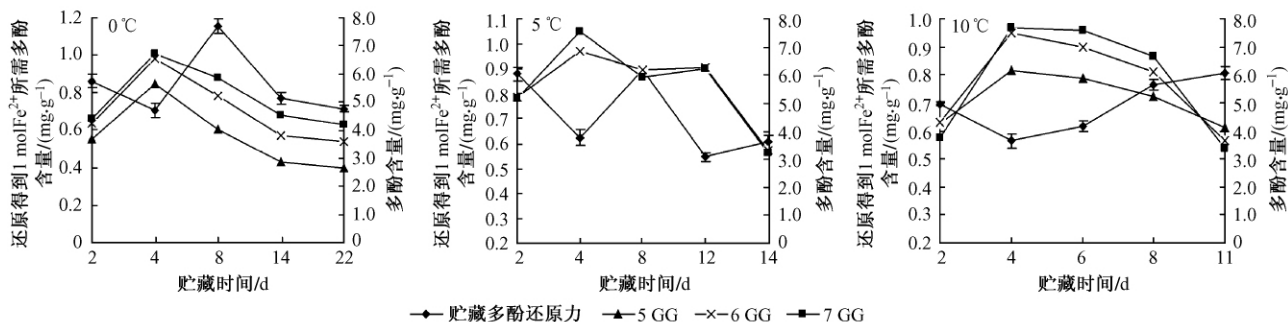


图8 香椿多酚还原铁离子能力与没食子酸衍生物含量变化的关系

Fig. 8 Correlations between the ferric reducing ability of phenolics and the content of gallic acid derivant

选用 DPPH 自由基清除法 (DPPH 法) 和铁离子还原比色法 (FRAP 法) 评价香椿经贮藏后多酚提取液的抗氧化活性变化, 并分析了该变化与样品中没食子酸衍生物含量变化之间的关系, 得到如下结论:

1) DPPH 自由基清除法及铁离子还原比色法的动力学反应模式表现为对香椿多酚浓度及反应时间的双重依赖关系, 选择 60 min 时较为稳定的吸光值作为反应终点, 用于计算对 DPPH 自由基的清除率或用于评价样品的铁离子还原能力, 数据重现性较好, 可用于测定大批量样品的抗氧化性。

2) DPPH 自由基清除法测定中, 香椿多酚同 BHT 标准品相比, 清除 50% DPPH 自由基所需要的香椿多酚含量仅为所需 BHT 含量的 29%; 在铁离子还原比色法测定中, 香椿多酚与抗坏血酸标准品相比, 同样还原得到 1 mol Fe^{2+} 所需的香椿多酚含量为抗坏血酸的 41%。可以看出, 香椿多酚具有较强的抗氧化性。

3) 采用 DPPH 自由基清除法和铁离子还原比色法分别测定了香椿在不同贮藏条件下多酚抗氧化性的变化, 并与 HPLC 法检测的主要多酚组分含量变化规律对比, 可以看出, 在 0、5、10 °C 下贮藏第 4 天时, 多酚清除 DPPH 自由基的能力及对铁离子的还原能力均最强, 同样在该贮藏条件下 5GG、6GG、7GG 3 种酚酸葡萄糖酯类物质的含量也达到最高。

4) 采用 DPPH 自由基清除能力与铁离子还原能力来评价香椿多酚提取液的抗氧化性, 得到的结果相符, 2 种方法均适用于评价香椿多酚抗氧化活性。香椿的抗氧化性主要取决于 5GG、6GG、7GG 3 种没食子酸葡萄糖酯类物质, 多酚抗氧化性的变化与酚酸类物质含量的变化正相关。

参 考 文 献

- [1] 中国农业科学院蔬菜花卉研究所. 中国蔬菜栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1987: 800-803.
- [2] 禄文林, 李秀信. 香椿皂苷的提取及抑菌活性的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 29(1): 227-229.
- [3] CHANG H C, HUANG W C, HUANG M S, *et al.* Extract from the leaves of *Toona sinensis* Roemer exerts potent antiproliferative effect on human lung cancer cells [J]. *Am J Chin Med*, 2002, 30: 307-314.
- [4] 宋元林, 赵文祥, 张颖. 香椿、莴苣、荷兰豆、青花菜栽培新技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 1-6.
- [5] LANGDON T T. Prevent browning in fresh prepared potatoes without the use of sulfating agents [J]. *Food Technol*, 1987, 41(5): 64-67.
- [6] IYENGAR R, MCEVILY A J. Anti-browning agents: Alternative to the use of sulfites in foods [J]. *Trends Food Science Technol*, 1992, 3: 60-64.
- [7] 李宁, 郁志芳, 赵友兴. 鲜切果蔬脱色与褐变的最新研究进展 [J]. 中国畜产与食品, 1999(2): 83-84.
- [8] 郁志芳, 田瑞锋, 李妍, 等. 香椿冷藏期间酚类物质及相关酶活性的变化 [J]. 食品科学, 2004, 25(4): 165-167.
- [9] HUKKANEN A T, PÖLÖNEN S S, KÄRENlampi S O, *et al.* Antioxidant capacity and phenolic content of sweet rowanberries [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 112-119.
- [10] PANY J, SU L, MOORE J, *et al.* Chemical compositions, antioxidant capacities, and anti-proliferative activities of selected fruit seed flours [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 3773-3778.
- [11] PRIOR R, WU X, SCHICH K. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(10): 4290-4302.
- [12] SCHLESIER K, HARWAT M, BOHM V, *et al.* Assessment of antioxidant activity by using different *in vitro* methods [J]. *Free Radical Res*, 2002, 36: 177-187.
- [13] STRATIL P, KLEJDUS B, KUBAN V. Determination of total content of phenolic compounds and their antioxidant activity in vegetable—evaluation of spectrophotometric methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(3): 607-616.
- [14] XIONG S, MELTON L D, EASTEAL A J, *et al.* Stability and antioxidant activity of black currant anthocyanins in solution and encapsulated in glucan gel [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(17): 6201-6208.
- [15] OZGEN M, REESE R N, TULIOJRA Z, *et al.* Modified 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) method to measure antioxidant capacity of selected small fruits and comparison to ferric reducing antioxidant power (FRAP) and 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) methods [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(4): 1151-1157.
- [16] AWIKA J M, ROONEY L W, WU X L, *et al.* Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(23): 6657-6662.
- [17] 张丽平, 童华荣. 抗氧化能力测定方法的研究进展 [J]. 中国食品添加剂, 2004(3): 108-113.
- [18] BENZIE I F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay [J]. *Anal Biochem*, 1996, 239(1): 70-76.
- [19] YANG Y, WANG J, DAI Y Q, *et al.* Identification of ethyl gallate in *Toona sinensis* and its changes during the storage [C]// LIU J, VITTORI S, YANG C. *Proceedings of 2009 international conference of natural products and traditional medicine*. Xi'an: Scientific & Technical Development Inc, 2009: 553-556.
- [20] 石碧, 狄莹. 植物多酚 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 5-45.
- [21] 冯卫华. 采后香椿衰老褐变相关因素分析 [D]. 北京: 农业大学, 2007.
- [22] WANG K J, YANG C R, ZHANG Y J. Phenolic antioxidants from Chinese toon (fresh young leaves and shoots of *Toona sinensis*) [J]. *Food Chem*, 2007, 101(1): 365-371.

(责任编辑 董晓燕)