

不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响

施英, 张超, 邱新容, 辜春鹤, 朱科学, 张彦军, 陈小爱

Effects of Different Drying Methods on Polyphenol Content and Antioxidant Activity of Noni Fruit

SHI Ying, ZHANG Chao, QIU Xinrong, GU Chunhe, ZHU Kexue, ZHANG Yanjun, and CHEN Xiaoi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

强化发酵对诺丽果成分的影响及抗氧化活性研究

Effects of Intensified Fermentation on the Components of Noni Fruit and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(15): 143-149,157 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.023>

不同干燥方式对金针菇品质及多酚氧化酶活性的影响

Effects of Different Drying Methods on Quality and Polyphenol Oxidase Activities of *Flammulina filiformis*

食品工业科技. 2019, 40(22): 77-81 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.014>

不同干燥方法对生姜叶活性成分和抗氧化活性的影响

Effects of Different Drying Methods on Active Components and Antioxidant Activities of Ginger Leaves

食品工业科技. 2020, 41(18): 75-80,86 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.012>

干燥温度对醇提余甘子多酚含量及其抗氧化活性的影响

Effect of Drying Temperature on Phenolic Contents and Its Antioxidant Activity of *Phyllanthus emblica* L.

食品工业科技. 2019, 40(24): 57-61 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.010>

诺丽多糖的单糖组成分析及体外抗氧化活性研究

Study on monosaccharide compositions analysis and antioxidant activity in vitro of polysaccharides from Noni

食品工业科技. 2017(17): 56-60 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.17.011>

干燥方式对苜蓿超微粉物化特性及抗氧化活性的影响

Effects of Drying Methods on Physical and Chemical Properties and Antioxidant Activity of Alfalfa Superfine Powders

食品工业科技. 2018, 39(13): 84-88,186 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.13.016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

施英, 张超, 邱新容, 等. 不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 198–204. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080250

SHI Ying, ZHANG Chao, QIU Xinrong, et al. Effects of Different Drying Methods on Polyphenol Content and Antioxidant Activity of Noni Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 198–204. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080250

· 工艺技术 ·

不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响

施英^{1,2,3}, 张超^{1,2}, 邱新容^{1,2}, 辜春鹤^{1,2}, 朱科学^{1,2}, 张彦军^{1,2}, 陈小爱^{1,2,*}

(1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533;

2. 海南省特色热带作物适宜性加工与品质控制重点实验室, 海南万宁 571533;

3. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000)

摘要: 为比较不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响, 本研究采用福林-酚比色法及高效液相色谱法 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 分别测定自然晒干、真空冷冻干燥、热风干燥后诺丽果样品的总酚含量及七种酚类化合物的含量, 并采用自由基清除能力和铁离子还原能力实验测定各样品的抗氧化能力。结果表明, 自然晒干、真空冷冻干燥和热风干燥后诺丽果总酚含量分别是 7.78、12.42 和 6.38 mg/g; 对 DPPH 自由基清除能力分别是 17.57、35.98、13.63 $\mu\text{mol Trolox/g}$; 对 ABTS⁺ 清除能力分别是 17.57、36.09、13.63 $\mu\text{mol Trolox/g}$; FRAP 抗氧化值分别是 43.12、73.49、39.12 $\mu\text{mol Trolox/g}$; 自然晒干和热风干燥的诺丽果中总酚含量及抗氧化性没有显著性差异 ($P>0.05$), 而两者与真空冷冻干燥的样品相比存在显著性差异 ($P<0.05$)。HPLC 分析结果表明, 真空冷冻干燥后诺丽果中七种多酚化合物含量总值最高, 达到 1207.42 $\mu\text{g/g}$ 。由此可见, 真空冷冻干燥处理对诺丽果多酚的含量和抗氧化能力影响较小, 优于其它两种干燥方法, 适于工业生产较高品质及高抗氧化活性的诺丽果产品。

关键词: 诺丽果, 自然晒干, 真空冷冻干燥, 热风干燥, 多酚, 抗氧化活性

中图分类号: TS255.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)12-0198-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080250

本文网刊:



Effects of Different Drying Methods on Polyphenol Content and Antioxidant Activity of Noni Fruit

SHI Ying^{1,2,3}, ZHANG Chao^{1,2}, QIU Xinrong^{1,2}, GU Chunhe^{1,2}, ZHU Kexue^{1,2}, ZHANG Yanjun^{1,2},
CHEN Xiaoi^{1,2,*}

(1. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China;

2. Key Laboratory of Processing Suitability and Quality Control of the Special Tropical Crops of Hainan Province,
Wanning 571533, China;

3. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er 665000, China)

Abstract: In this study, the effects of different drying methods on the polyphenol content and antioxidant activity of noni fruit were compared. The total phenol content and the content of seven phenolic compounds in noni samples after natural sun-drying, vacuum freeze-drying, and hot-air drying were determined using the forint-phenol colorimetric method and high-performance liquid chromatography (HPLC). The antioxidant capacity of each sample was assessed using the free radical scavenging ability and iron ion reducing ability experiment. The results showed that the total phenolic content of

收稿日期: 2023-08-24

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目 (322QN399); 海南省万宁市重点科研项目 (2022wnkj05); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目 (CATASCXTD202304)。

作者简介: 施英 (2001-), 女, 本科, 研究方向: 中草药鉴定与功效评价, E-mail: 3347166694@qq.com。

* 通信作者: 陈小爱 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究实习员, 研究方向: 热带作物加工与功能评价, E-mail: cxarky@126.com。

noni fruit after natural sun-drying, vacuum freeze-drying and hot air-drying were 7.78, 12.42 and 6.38 mg/g, respectively. The scavenging ability against DPPH radicals were 17.57, 35.98 and 13.63 $\mu\text{mol Trolox/g}$, and the scavenging ability against ABTS⁺ were 17.57, 36.09, 13.63 $\mu\text{mol Trolox/g}$. The FRAP antioxidant values were 43.12, 73.49, 39.12 $\mu\text{mol Trolox/g}$, respectively. There was no significant difference ($P>0.05$) in total polyphenol content and antioxidant properties between the noni fruits after naturally sun-drying and hot air-drying. However, these properties were significantly different ($P<0.05$) from vacuum freeze-dried samples. HPLC analysis revealed that the total value of seven phenolic compounds in noni fruit was the highest after vacuum freeze-drying, reaching 1207.42 $\mu\text{g/g}$. This indicated that vacuum freeze-drying had a lesser effect on the content and antioxidant capacity of noni fruit polyphenols compared to the other two drying methods. Therefore, it was deemed more suitable for the industrial production of higher quality and high antioxidant activity of noni fruit products.

Key words: noni; natural sun-drying; vacuum freeze-drying; hot air-drying; polyphenol; antioxidant activity

诺丽(Noni)即海巴戟(*Morinda citrifolia* L.), 是一种多年生茜草科属植物, 分布在热带和温热带地区^[1]。诺丽果具有很高的营养价值, 目前已有研究表明诺丽果的不同部位含有近 200 种生物活性植物化学成分, 包括酚类、类黄酮、酮类、环烯醚萜类、木质素、类胡萝卜素、香豆素、萜醌等^[2]。其中多酚是诺丽果中最具代表性的生物活性成分, 药理学研究表明其具有强大的抗氧化和神经保护作用^[3]。

诺丽果虽营养成分丰富, 但它是一种呼吸跃变型果实, 采收后极易腐烂, 表现为颜色变黑, 果实变软, 并产生腐臭味^[4]。这不利于诺丽果的贮藏运输与产业化加工, 影响其经济价值。目前, 干燥是用于大多数农产品加工与贮藏的主要方法之一^[5]。晒干、冻干、烘干及真空干燥等被作为食品加工的主要方式^[6]。其中, 自然晒干作为一种便利且实惠的干燥方法, 可以节省能源和设备成本, 但干燥时间较长, 人工成本较高, 干燥过程中易受昆虫和粉尘混入、天气原因等导致品质变差^[7]。热风干燥可以很好地控制温度、相对湿度以及各种污染源等条件, 从而获得高质量的产品, 并且成本低, 操作简单, 但干燥时间长, 营养物质流失严重^[8]。真空冷冻干燥可以很好的保持食品中原有的外观、颜色和风味, 同时具有较好的速溶和快速复水效果, 广泛应用于食品粉剂的生产, 但能源消耗较大, 价格偏贵^[9]。

目前, 诺丽果多酚的生物活性及应用逐渐受到学界的关注, 如 Mireles-Arriaga 等^[10] 研究了对流干燥对诺丽果的颜色、多酚含量及抗氧化能力的影响。汪瑞敏等^[11] 研究了不同溶剂对诺丽果籽提取物中多酚组成和抗氧化能力的影响。张清月等^[12] 比较研究了诺丽果多酚与多糖、黄酮的抗氧化能力。且干燥工艺在诺丽果加工产业已得到较好的应用, 有相关研究表明, 不同的加工方法不可避免地会改变多酚组成并进一步影响其生物活性^[13]。例如, 与真空冷冻干燥相比, 热风干燥大大降低了荔枝多酚的含量及抗氧化活性^[14]。然而, 南瓜的热风干燥工艺导致其多酚含量高于真空冷冻干燥工艺^[15]。由此可以看出, 为了保留食品中更多的营养及活性成分, 不同食品应通过相应的研究找到其合适的干燥方式^[9]。因此, 比

较不同干燥方式对诺丽果品质的影响是一项有意义的研究。但是, 不同干燥方式对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响报道较少, 仅见 Tuyen 等^[4] 报道了晒干、微波干燥和热泵干燥对诺丽果不同提取物理特性、黄酮和多酚含量及抗氧化活性的影响, 结果表明微波干燥法对诺丽果品质的稳定性影响最小。而关于对比自然晒干、热风干燥和真空冷冻干燥法对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性影响的研究尚未见报道。

基于此, 本研究通过比较自然晒干、真空冷冻干燥、热风干燥对诺丽果总酚含量、七种多酚化合物含量及其抗氧化活性的影响, 以期对诺丽果高质量产品的开发及其产业化应用提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

八成熟诺丽鲜果 采摘于海南省三亚诺丽果种植基地; 咖啡酸、芦丁、东莨菪内酯、橙皮苷、新橙皮苷、槲皮素、柚皮素、没食子酸标准品、水溶性 VE(Trolox)(色谱纯($\geq 98\%$))、福林酚、ABTS、DPPH、TPTZ 上海源叶生物科技有限公司提供; 除特别说明外, 其他试剂均为分析纯。

JB/T5374-1991 型电子分析天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; S600 型超声波清洗仪 东莞市墨洁超声波设备有限公司; CT18RT 型离心机 上海天美有限公司; DHG-9240 型电热热风干燥箱 上海恒科学仪器有限公司; 2500C 型多功能粉碎机 东莞市房太电器有限公司; 中孚冷链 TFDX0.250 型真空冷冻干燥机 中国山东烟台中孚冷链设备有限公司; SynergyH1 型全波长扫描多功能读数仪 美国 Biotek 有限公司; 1290 Infinity 型超高效液相色谱仪 美国安捷伦有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 诺丽果洗净后用多功能粉碎机打碎, 采用自然晒干(以下简称晒干)、真空冷冻干燥(以下简称冻干)、热风干燥(以下简称烘干)3 种方式对诺丽果进行干燥处理。其中自然晒干法是将样品于晴朗的天气下干燥 60 h, 温度约为 25~30 $^{\circ}\text{C}$; 真空冷冻干燥法是将样品于 -25 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中预冻后, 在冷

阱温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空度为 25 Pa 条件下的食品级真空冷冻干燥设备干燥 24 h ;热风干燥法是在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的烘箱干燥 48 h 。各干燥方式处理后样品含水量均低于 8% ,干燥粉碎后密封避光保存,备用。

1.2.2 诺丽果多酚类物质的提取 采用超声波辅助提取法^[12],并略作修改。准确称取过 $60\text{ }\mu\text{m}$ 筛后的诺丽果粉 1 g ,加入 35 mL 的 90% 的乙醇溶液,在温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、功率为 400 W 的超声波条件下提取 15 min 后进行离心(1200 r/min , 15 min),取上清液,用 90% 的乙醇溶液定容至 35 mL ,即为诺丽果多酚提取液。

1.2.3 多酚类物质含量的测定

1.2.3.1 总黄酮含量的测定 采用比色法^[16],略作修改。取 5 mL 诺丽果多酚提取液,然后加入 0.3 mL 、 5% NaNO_2 溶液,混合均匀后,室温静置 6 min 。再加入 0.3 mL 、 5% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液,混合均匀,室温保存 6 min 。最后加入 4.4 mL 、 4% NaOH 溶液,混合均匀,室温保存 12 min 。于 510 nm 测吸光度,使用芦丁做标准曲线,浓度范围为 $0\sim 0.5\text{ mg/mL}$ 。实验结果以 mg GAE/g DW 表示。

1.2.3.2 总酚含量的测定 采用福林-酚比色法^[17]。取 1 mL 稀释到适宜浓度的诺丽果多酚提取液,依次加入 0.2 mL 福林酚试剂、 2 mL Na_2CO_3 溶液(7% , $\text{m}:\text{V}$)、 1.6 mL 去离子水后,振荡摇匀,在室温且黑暗的条件下静置 90 min ,于 760 nm 测吸光值。使用没食子酸做标准曲线,浓度范围为 $0\sim 50\text{ }\mu\text{g/mL}$ 。实验结果以 mg GAE/g DW 表示。

1.2.3.3 七种酚类化合物含量的测定 采用高效液相色谱法^[11]。色谱柱:以 Agilent C_{18} 柱($5\text{ }\mu\text{m}$, $250\text{ mm}\times 4.6\text{ mm}$)对其进行分离;柱温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,DAD检测器,检测波长 280 nm ,进样量 $10\text{ }\mu\text{L}$,流速 0.8 mL/min ,流动相A为乙腈,流动相B为 0.1% 甲酸水溶液。梯度洗脱程序: $0\sim 6\text{ min}$, 15% A; $6\sim 10\text{ min}$, 20% A; $10\sim 20\text{ min}$, 25% A; $20\sim 30\text{ min}$, 35% A; $30\sim 40\text{ min}$, 50% A; $40\sim 55\text{ min}$, 80% A; $55\sim 60\text{ min}$, 15% A。酚类化合物定性方法:样品和标准品出峰时间相差 0.1 s 以内,定量方法:使用咖啡酸、芦丁、东莨菪内酯、橙皮苷、新橙皮苷、槲皮素、柚皮素标准品制作标准曲线进行含量计算。

1.2.4 体外抗氧化能力测定

1.2.4.1 DPPH 自由基清除能力测定 参照尚红梅等^[18]的方法。取 0.1 mL 诺丽果多酚提取液与 3.9 mL DPPH 反应液(0.1 mmol/L ,用甲醇溶解,现配现用)在暗处反应 30 min ,于 515 nm 测吸光度,实验中,使用水溶性维生素E做标准曲线,浓度范围为 $200\sim 1000\text{ }\mu\text{mol/L}$ ($R^2=0.9994$)。实验结果以 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ 表示。

1.2.4.2 ABTS $^{\cdot+}$ 清除能力测定 参照尚红梅等^[18]的方法,并略微改动。 0.3 mL 诺丽果多酚提取液的稀释液(体积比 $1:4$)与 3 mL ABTS 反应溶液反应

30 min ,于 734 nm 下测吸光度,水溶性维生素E($50\sim 250\text{ }\mu\text{mol/L}$)做标准曲线($R^2=0.9993$)。实验结果以 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ 表示。

1.2.4.3 FRAP 抗氧化能力的测定 参照 Thaipong 等^[19]的方法,并略微改动。 $150\text{ }\mu\text{L}$ 诺丽果多酚提取液与 2.85 mL FRAP 工作液暗反应 30 min ,于 593 nm 下测吸光度,水溶性维生素E($100\sim 500\text{ }\mu\text{mol/L}$)做标准曲线($R^2=0.9994$)。实验结果以 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ 表示。

$$\text{FRAP值}(\mu\text{mol Trolox/g}) = \frac{C \times N \times V}{M}$$

式中: M 为诺丽果样品的干重, g ; N 为稀释倍数; V 为提取液定容的最终体积, mL ; C 为测试液等量的Trolox浓度, $\mu\text{mol/L}$ 。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次,所得结果均表示为平均值 $\pm$ 标准差。本研究使用Origin 8.0进行作图,SPSS 26.0软件处理数据,并用ANOVA和邓肯氏多重差异分析($P<0.05$),相关性分析采用Pearson's法。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对诺丽果总黄酮及总酚含量的影响

由图1A可知,真空冷冻干燥、自然晒干和热风干燥后诺丽果中总黄酮含量分别为 11.97 、 13.24 和 12.22 mg/g ,三种干燥方式后诺丽果中总黄酮含量没有显著性差异($P>0.05$)。基于此,本论文继续研究了这三种干燥方式对诺丽果总多酚含量的影响。

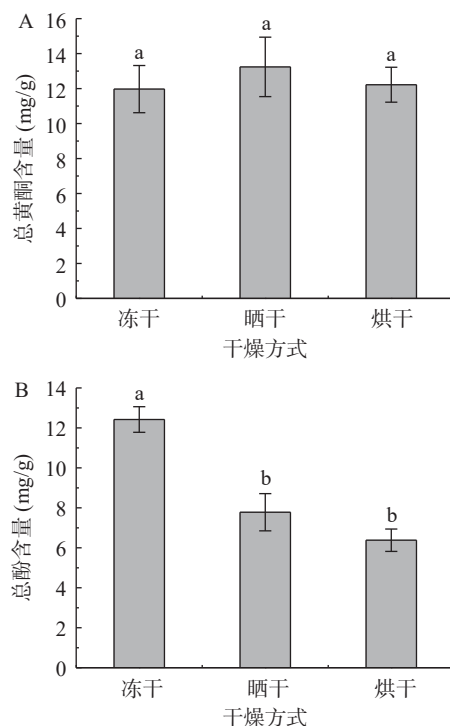


图1 不同干燥方式对诺丽果中总黄酮及总酚含量的影响

Fig.1 Effects of different drying methods on the content of total flavonoids and total phenols in noni fruit

注:不同小写字母表示结果具有差异性显著($P<0.05$),图3同。

由图 1B 可知, 真空冷冻干燥、自然晒干和热风干燥后诺丽果中总多酚含量分别为 12.42、7.78 和 6.38 mg/g, 真空冷冻干燥处理的诺丽果总酚显著高于自然晒干和热风干燥处理的样品($P<0.05$), 而自然晒干和热风干燥没有显著性差异($P>0.05$)。诺丽果中的总多酚在真空冷冻干燥处理后保留最多, 可能是因为真空冷冻干燥的低温条件有效避免多酚化合物的热降解, 与此同时, 高真空条件会影响多酚氧化酶进行反应, 进而避免了多酚化合物的损失^[20]。而虽然晒干和热风是目前应用比较广泛的干制方法, 但是由于多酚特有的羟基结构, 在高温条件下很容易被氧化分解, 且多酚化合物的氧化和降解速度会随着温度的升高和时间的延长而变快^[20], 故自然干燥和热风干燥对多酚化合物的稳定性影响较大。此结果与研究不同干燥方式对蓝莓叶、金银花多酚化合物的影响结果相似^[21-22], 但对于某些含有大量果胶物质的果蔬的研究却恰恰相反。郭泽美等^[6]研究四种不同干燥处理对的葡萄皮渣多酚及其抗氧化活性的影响, 结果显示, 热风干燥样品的总多酚保留最多。Chang 等^[23]的研究表明热风干燥处理的番茄总酚含量高于新鲜样品和真空冷冻样品。这可能是因为对于果胶物质含量较为丰富的葡萄皮、番茄等果蔬来说, 大多数的酚酸与果胶等碳水化合物及某些蛋白质等大分子结合在一起, 加热对组织细胞的破坏作用更大, 从而对多酚的释放有更加有利^[21]。

2.2 不同干燥方式对诺丽果多酚组成的影响

由于福林-酚比色法测定的总酚含量并不能具体到多酚单体的变化情况, 因此本研究利用超高效液相色谱仪对诺丽果七种多酚化合物进行准确的定性和定量分析。三种干燥样品及标准品的高效液相色谱图如图 2 所示, 各标准品的回归方程见表 1。

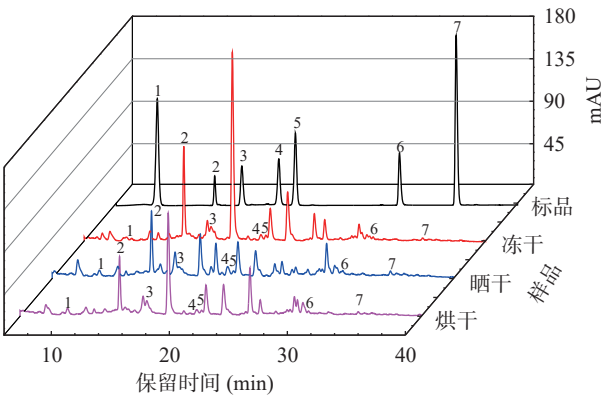


图 2 三种诺丽果干燥样品及标品的高效液相色谱图
Fig.2 High performance liquid chromatography of three dried samples and standards of noni fruit
注: 1~7 分别代表咖啡酸、芦丁、东莨菪内酯、橙皮苷、新橙皮苷、槲皮素、柚皮素。

不同干燥处理后诺丽果七种多酚化合物的具体含量如表 2 所示。表 2 结果表明, 芦丁的含量最高, 柚皮素的含量最低。由于诺丽果干制过程中, 多酚的裂解和合成同时发生, 造成了这 7 种多酚类物质的

表 1 七种标准品的回归方程

标准品	标准曲线	决定系数(R^2)	保留时间(min)
咖啡酸	$Y=32193x+1.8524$	1.0000	9.493
芦丁	$Y=7172.1x-1.1571$	0.9999	14.357
东莨菪内酯	$Y=12647x+1.9190$	1.0000	16.657
橙皮苷	$Y=16718x+15.962$	0.9993	19.789
新橙皮苷	$Y=20513x+4.5619$	0.9997	21.197
槲皮素	$Y=14910x-12.1520$	0.9997	30.017
柚皮素	$Y=45278x+16.7810$	0.9991	34.818

表 2 不同干燥方式对诺丽果酚类化合物含量的影响

干燥方式	冻干	晒干	烘干
咖啡酸($\mu\text{g/g}$)	20.83 ± 2.21^a	9.12 ± 0.42^b	9.99 ± 0.68^b
芦丁($\mu\text{g/g}$)	975.06 ± 88.46^a	767.96 ± 48.57^b	603.22 ± 33.40^c
东莨菪内酯($\mu\text{g/g}$)	124.01 ± 5.94^b	76.12 ± 9.22^c	161.97 ± 8.63^a
橙皮苷($\mu\text{g/g}$)	40.34 ± 0.92^b	108.3 ± 1.67^a	60.81 ± 1.03^b
新橙皮苷($\mu\text{g/g}$)	18.14 ± 1.52^a	12.74 ± 0.82^b	18.98 ± 1.78^a
槲皮素($\mu\text{g/g}$)	27.16 ± 2.81^c	59.20 ± 1.63^b	98.33 ± 5.70^a
柚皮素($\mu\text{g/g}$)	1.88 ± 0.26^c	5.33 ± 0.69^a	3.05 ± 0.43^b
总酚($\mu\text{g/g}$)	1207.42 ± 99.60^a	1038.77 ± 36.50^b	956.26 ± 34.00^b

注: 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差, 同一行不同小写字母表示结果差异显著($P<0.05$)。

含量变化, 该现象已在水芹、牛蒡片等^[24-25]植物干燥中得到了验证。对于芦丁含量而言, 冻干>晒干>烘干, 而槲皮素的含量大小关系却和芦丁的相反, 可能是因为芦丁是由槲皮素、葡萄糖和鼠李糖 3 部分组成^[26], 干燥过程中芦丁降解酶将芦丁转化为槲皮素^[27]。真空冷冻干燥后诺丽果中芦丁和咖啡酸保留最多, 含量分别为 975.06 和 20.83 $\mu\text{g/g}$; 自然晒干后诺丽果中橙皮素和柚皮素的损失最少, 含量分别为 108.3 和 5.33 $\mu\text{g/g}$; 热风干燥后诺丽果中东莨菪内酯、新橙皮苷和柚皮素保留最多, 含量分别为 161.97、18.98 和 98.33 $\mu\text{g/g}$ 。有研究发现, 受热会加速结合型多酚向游离型多酚的转变^[28], 所以可以推测出本研究测定的橙皮素、柚皮素及槲皮素等部分酚类化合物在自然晒干和热风干燥后的含量比真空冷冻干燥高, 是由于加热使其结合形式向游离形式转变。而从已鉴定的七种多酚来看, 真空冷冻干燥保留七种多酚的总含量显著高于其它两种方式($P<0.05$), 达到 1207.42 $\mu\text{g/g}$, 这一结果与 Alfaro 等^[29]的报道类似。总的来说, 三种不同干燥方式对诺丽果多酚含量的影响不同, 但真空冷冻干燥能够保留七种多酚含量的总和最多。

2.3 不同干燥方式对诺丽果抗氧化活性的影响

利用三种分析方法检测诺丽果多酚提取液的抗氧化性质。由图 3 得知, 真空冷冻干燥、自然晒干和热风干燥后诺丽果多酚提取液对 DPPH 自由基清除能力分别是 35.98、17.57 和 13.63 $\mu\text{mol Trolox/g}$, 对 ABTS⁺清除能力分别是 36.09、17.57 和 13.63 μmol

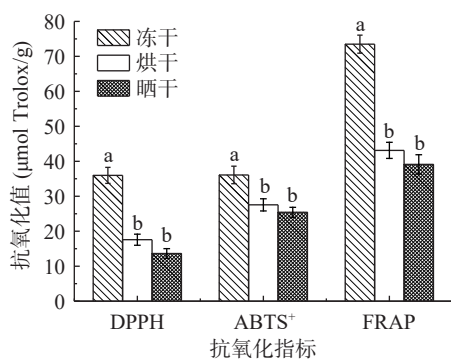


图3 不同干燥方式对诺丽果 DPPH、ABTS⁺及 FRAP 抗氧化指标的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on antioxidant indexes of DPPH, ABTS⁺ and FRAP in noni fruit

Trolox/g, 同时 FRAP 抗氧化值分别是 73.49、43.12 和 39.12 μmol Trolox/g。不同干燥方式对诺丽果多酚提取液抗氧化活性的影响与对总酚的影响相似。真空冷冻干燥处理的诺丽果多酚抗氧化性显著高于自然晒干和热风干燥处理的样品($P<0.05$), 自然晒干和热风干燥没有显著性差异($P>0.05$)。以上抗氧化结果与相关文献研究结论相似, 例如, 与其他干燥方式相比, 真空冷冻干燥后荔枝^[14] 和苹果幼果^[30] 多酚

的 DPPH 自由基清除能力最强。多酚作为一种具有极强抗氧化活性的生物活性化学成分, 其作用机理是较为敏感的邻位酚羟基氧化成醌类, 并且在这个过程中, 通过消耗周围的氧气来灭活自由基^[31]。真空冷冻干燥后诺丽果的总多酚含量最多是其抗氧化性最强的直接原因, 并且真空冷冻干燥后的诺丽果肉质更加松散, 有很多孔隙, 这有助于多酚类物质的提取^[32]。自然晒干和热风干燥导致诺丽果抗氧化活性显著($P<0.05$)降低, 这可能与诺丽果中多酚含量降低及美拉德反应使得抗氧化剂的热降解或消耗有关^[33]。

2.4 相关性分析

不同干燥方式处理后诺丽果总酚含量、七种多酚化合物含量及抗氧化活性的相关性分析见表 3。由表 3 可知, 诺丽果的总酚含量与三种抗氧化指标呈显著正相关($P<0.05$), 表明多酚含量对诺丽果抗氧化活性贡献较大。咖啡酸、芦丁与三种抗氧化指标呈现正相关, 相关性系数均在 0.9 以上, 而东莨菪内酯、橙皮苷、槲皮素、柚皮素与三种抗氧化指标呈负相关, 这未能定论这七种单体酚的抗氧化活性较弱, 可能是由于每一种酚类物质对抗氧化能力的贡献不一致而导致的, 具体有待进一步研究。

表 3 不同干燥方式诺丽果酚类化合物含量及其抗氧化活性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of phenolic compounds content and antioxidant activity of noni fruit in different drying methods

项目	DPPH自由基清除率	ABTS ⁺ 清除能力	FRAP值	总酚含量	咖啡酸含量	芦丁含量	东莨菪内酯含量	橙皮苷含量	新橙皮苷含量	槲皮素含量	柚皮素含量
DPPH自由基清除率	1										
ABTS ⁺ 清除能力	0.999*	1									
FRAP值	0.998*	0.997	1								
总酚含量	0.999*	0.998*	0.999*	1							
咖啡酸含量	0.973	0.967	0.985	0.982	1						
芦丁含量	0.940	0.964	0.939	0.945	0.866	1					
东莨菪内酯含量	-0.099	-0.123	-0.040	-0.058	0.133	-0.381	1				
橙皮苷含量	-0.610	-0.590	-0.656	-0.642	-0.776	-0.356	-0.728	1			
新橙皮苷含量	0.244	0.220	0.300	0.283	0.460	-0.046	0.941	-0.993	1		
槲皮素含量	-0.915	-0.927	-0.890	-0.898	-0.797	-0.992	0.492	-0.053	0.169	1	
柚皮素含量	-0.643	-0.624	-0.687	-0.674	-0.802	-0.395	-0.699	0.944	-0.900	0.279	1

注: *表示在0.05水平显著相关。

3 结论

本研究比较与分析了自然晒干、真空冷冻干燥和热风干燥对诺丽果多酚含量及其抗氧化活性的影响。结果表明, 自然晒干、真空冷冻干燥和热风干燥后诺丽果总酚含量分别是 7.78、12.42 和 6.38 mg/g; 对 DPPH 自由基清除能力分别是 17.57、35.98、13.63 μmol Trolox/g; 对 ABTS⁺清除能力分别是 17.57、36.09、13.63 μmol Trolox/g; 以及 FRAP 抗氧化值分别是 43.12、73.49、39.12 μmol Trolox/g; 真空冷冻干燥处理的诺丽果总酚及抗氧化性显著高于自然晒干和热风干燥处理的样品($P<0.05$), 自然晒干和热风干燥没有显著性差异($P>0.05$)。高效液相色谱分析结果表明, 三种不同干燥方式对诺丽果七种多酚

化合物含量的影响不同, 其中真空冷冻干燥后诺丽果七种多酚化合物含量总值最高, 达到 1207.42 μg/g。相关性分析表明, 诺丽果总多酚含量可以较好的反映其抗氧化活性。

综上所述, 真空冷冻干燥能保留诺丽果更多的多酚含量, 且抗氧化能力最强, 优于其它两种干燥方法, 较适于工业生产较高品质及高抗氧化活性的诺丽果产品。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] BUI A K T, BACIC A, PETTOLINO F. Polysaccharide composition of the fruit juice of *Morinda citrifolia* (Noni)[J]. *Phytochemistry*, 2006, 67(12): 1271–1275.
- [2] YE J B, REN G, LI W Y, et al. Characterization and identification of prenylated flavonoids from *Artocarpus heterophyllus* Lam. roots by quadrupole time-of-flight and linear trap quadrupole orbitrap mass spectrometry[J]. *Molecules*, 2019, 24(24): 4591.
- [3] PACHAURI S D, VERMA P R P, DWIVEDI A K, et al. Ameliorative effect of Noni fruit extract on streptozotocin-induced memory impairment in mice[J]. *Behavioural Pharmacology*, 2013, 24(4): 307–319.
- [4] TUYEN K C, CONG N T, THINH P V, et al. Effects of various drying methods on physicochemical characteristics, flavonoids and polyphenol content, and antioxidant activities of different extracts from *Morinda citrifolia* fruit[J]. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 2020, 32(37): 72–82.
- [5] TAN S, KE Z L, CHAI D, et al. Lycopene, polyphenols and antioxidant activities of three characteristic tomato cultivars subjected to two drying methods[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128062.
- [6] 郭泽美, 任章成, 陈腾, 等. 干燥方式对葡萄皮多酚及其抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(11): 117–121. [GUO Zemei, REN Zhangcheng, CHEN Teng, et al. Effect of drying methods on polyphenols content and antioxidant activity of grape skin[J]. *Food Science*, 2013, 34(11): 117–121.]
- [7] TOĞRUL İ T, PEHLIVAN D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 65(3): 413–425.
- [8] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Trends in processing technologies for dried aquatic products[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(4): 382–394.
- [9] 谭颢, 彭思维, 李玮轩, 等. 不同干燥方式对龙眼多酚及抗氧化活性的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(3): 411–420. [TAN Yi, PENG Siwei, LI Weixuan, et al. Effects of different drying methods on polyphenol profile and antioxidant activities in longan[J]. *Journal of Fruit Trees*, 2021, 38(3): 411–420.]
- [10] MIRELES-ARRIAGA A I, RUIZ-LÓPEZ I I, HERNÁNDEZ-GARCÍA P A, et al. The impact of convective drying on the color, phenolic content and antioxidant capacity of noni (*Morinda citrifolia* L.) [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 36: 583–590.
- [11] 汪瑞敏, 李朝辉, 赵丰年, 等. 不同溶剂对诺丽籽提取物中多酚构成谱和抗氧化能力、抑菌活性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(10): 169–176. [WANG Ruimin, LI Chaohui, ZHAO Fengnian, et al. Effect of different extraction solvents on phenolics profile, antioxidant activity and antibacterial activity of noni (*Morinda citrifolia* L.) seed extracts[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(10): 169–176.]
- [12] 张清月, 董妹慧, 李胤豪, 等. 诺丽果不同提取物抗氧化能力的比较研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(5): 144–150. [ZHANG Qingyue, DONG Shuhui, LI Yinhao, et al. Comparative study on antioxidant ability of extracts from noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit with different solvents[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2022, 37(5): 144–150.]
- [13] SHINGAI Y, FUJIMOTO A, NAKAMURA M, et al. Structure and function of the oxidation products of polyphenols and identification of potent lipoxygenase inhibitors from Fe-catalyzed oxidation of resveratrol[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(15): 8180–8186.
- [14] TAN S, TANG J M, SHI W J, et al. Effects of three drying methods on polyphenol composition and antioxidant activities of *Litchi chinensis* Sonn[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2020, 29: 351–358.
- [15] AYDIN E, GOCMEN D. The influences of drying method and metabisulfite pre-treatment on the color, functional properties and phenolic acids contents and bioaccessibility of pumpkin flour[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 385–392.
- [16] XIE Y H, ZHENG Y X, DAI X L, et al. Seasonal dynamics of total flavonoid contents and antioxidant activity of *Dryopteris erythrosora* [J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 113–118.
- [17] 余祥英, 郑佳楠, 陈晓纯, 等. 不同干燥方式对陈皮中 7 种黄酮含量及抗氧化性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(7): 2075–2083. [YU Xiangying, ZHENG Jianan, CHEN Xiaochun, et al. Effects of drying methods on the content of 7 kinds of flavonoids and antioxidant activity in *Citri reticulatae* Pericarpium [J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2022, 13(7): 2075–2083.]
- [18] 尚红梅, 郭玮, 潘丹, 等. 干燥方式对菊苣根多酚含量和抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(1): 84–88. [SHANG Hongmei, GUO Wei, PAN Dan, et al. Effects of drying methods on polyphenol contents and antioxidant activities of chicory root[J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 84–88.]
- [19] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, et al. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(6-7): 669–675.
- [20] 李帆, 邵佩兰, 韩姪婷, 等. 干燥方式对红枣色素活性成分含量及抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 120–124. [LI Fan, SHAO Peilan, HAN Yating, et al. Effect of drying methods on active component contents and antioxidant activity of jujube pigment[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(1): 120–124.]
- [21] 李晓英, 薛梅, 樊汶樵, 等. 不同干燥方式对蓝莓叶中酚类物质及其抗氧化活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2570–2578. [LI Xiaoying, XUE Mei, FAN Wenqiao, et al. Analysis of phenolic compounds and antioxidant activities of blueberry leaves from different drying methods[J]. *China Agricultural Science*, 2018, 51(13): 2570–2578.]
- [22] 邹容, 游玉明, 陈泽雄, 等. 干燥方式对金银花多酚组分及其抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(5): 78–83. [ZOU Rong, YOU Yuming, CHEN Zexiong, et al. Effects of drying methods on polyphenol compounds and antioxidant activities of *Lonicera japonica* flower[J]. *Food Science*, 2016, 37(5): 78–83.]
- [23] CHANG C H, LIN H Y, CHANG C Y, et al. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 478–485.
- [24] 齐晓花, 陈国华, 侯顺超, 等. 干燥方式对水芹多酚组分及抗氧化能力的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, 41(6): 90–95. [QI Xiaohua, CHEN Guohua, HOU Shunchao, et al. Effects of drying process on polyphenol ingredients and antioxidant ability of *Oenanthe javanica* D. C [J]. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2020, 41(6): 90–95.]
- [25] 张钟元, 朱翠平, 李大婧, 等. 不同干燥方式对牛蒡片多酚含量及抗氧化能力的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 172–178. [ZHANG Zhongyuan, ZHU Cuiping, LI Dajing, et al. Effects of different drying methods on polyphenols and antioxidant activities of burdock roots slices[J]. *Jiangsu Agricultural Journal*, 2018, 34(1): 172–178.]

- [26] 李珂, 冯亚莉, 曹瑞梅, 等. 芦丁的结构修饰及生物活性研究进展[J]. 中草药, 2021, 52(20): 6413–6424. [LI Ke, FENG Yali, CAO Ruimei, et al. Research progress on structural modification and biological activity of rutin[J]. Chinese Herbal Medicine, 2021, 52(20): 6413–6424.]
- [27] LUKŠIĆ L, BONAFACCIA G, TIMORACKA M, et al. Rutin and quercetin transformation during preparation of buckwheat sourdough bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 69: 71–76.
- [28] 忻晓庭, 刘大群, 郑美瑜, 等. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 148–156. [XIN Xiaoting, LIU Daqun, ZHENG Meiyu, et al. Effect of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of ice plant[J]. Journal of China Foods Limited, 2020, 20(11): 148–156.]
- [29] ALFARO S, MUTIS A, QUIROZ A, et al. Effects of drying techniques on murtilla fruit polyphenols and antioxidant activity[J]. *Journal of Food Research*, 2014, 3(5): 73.
- [30] 陈玮琦, 郭玉蓉, 张娟, 等. 干燥方式对苹果幼果干酚类物质及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(5): 33–37. [CHEN Weiqi, GUO Yurong, ZHANG Juan, et al. Effect of drying methods on polyphenol contents and antioxidant activities of unripe apple fruits[J]. Food Science, 2015, 36(5): 33–37.]
- [31] 赵磊, 高民, 马燕芬. 茶多酚的抗氧化作用及其机制[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(6): 1861–1865. [ZHAO Lei, GAO Min, MA Yanfen. Anti-oxidation functions of tea polyphenols and their mechanisms[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(6): 1861–1865.]
- [32] 赵愉涵, 袁丽雪, 王敏, 等. 不同干燥方式对芹菜叶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 205–211. [ZHAO Yuhan, YUAN Lixue, WANG Min, et al. Effects of different drying methods on quality attributes of celery leaves[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(8): 205–211.]
- [33] MA T T, TIAN C R, LUO J Y, et al. Influence of technical processing units on polyphenols and antioxidant capacity of carrot (*Daucus carrot* L.) juice[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 1637–1644.