

干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响

宋娟, 张海燕, 曾朝珍, 袁晶, 慕钰文, 康三江, 文鹏程

Effects of Drying Methods on Quality Characteristics and Flavor of Dried Apples

SONG Juan, ZHANG Haiyan, ZENG Chaozhen, YUAN Jing, MU Yuwen, KANG Sanjiang, and WEN Pengcheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090258>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于电子鼻和顶空气相色谱-离子迁移谱分析不同干燥方式对羊肚菌挥发性化合物的影响

Analysis the Effects of Different Drying Methods on the Volatile Compounds in *Morchella esculenta* Based on Electronic Nose and Headspace Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

食品工业科技. 2024, 45(7): 261-269 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050088>

不同干燥方式对黄桃果干品质的影响

Effects of Different Drying Methods on The Quality of Dried Yellow Peach Slices

食品工业科技. 2023, 44(24): 327-333 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020142>

干燥方式对猕猴桃果干品质的影响

Effects of Drying Methods on the Quality of Dried Kiwifruit

食品工业科技. 2022, 43(24): 62-71 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030156>

基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻技术分析制坯方式对三华李果坯挥发性成分的影响

Effects of Billet-Making Methods on Volatile Flavor Components of Sanhua Plum Fruit Billets Based on Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Nose

食品工业科技. 2023, 44(23): 253-261 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010024>

干燥方式对苹果果胶含量及品质特性的影响

Influence of Drying Methods on Apple Pectin Content and Quality Characteristics

食品工业科技. 2024, 45(8): 88-96 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050157>

基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分

Analysis of Volatile Compounds in the Manufacturing Process of *Eucommia Ulmoides* Leaves Fu Brick Tea Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Method

食品工业科技. 2021, 42(21): 73-82 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020147>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宋娟, 张海燕, 曾朝珍, 等. 干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 221-231. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090258

SONG Juan, ZHANG Haiyan, ZENG Chaozhen, et al. Effects of Drying Methods on Quality Characteristics and Flavor of Dried Apples[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 221-231. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090258

· 包装与机械 ·

干燥方式对苹果干品质特性及风味的影响

宋娟^{1,2}, 张海燕¹, 曾朝珍¹, 袁晶¹, 慕钰文¹, 康三江^{1*}, 文鹏程^{2,*}

(1. 甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 为探究提高静宁苹果干零食品质的加工方式, 本研究探讨了 5 种干燥方式 (热风干燥、太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波-压差膨化干燥和热泵干燥) 对苹果干能耗、抗氧化活性、微观结构和风味的影响。结果表明, 和其它 4 种方式相比, 在能耗方面, 真空冷冻干燥的单位能耗最高 (69.48±1.69 kW·h/kg), 而太阳能干燥的单位能耗最低 (19.60±1.36 kW·h/kg); 在硬脆度方面, 热风干燥的苹果干具有最高的硬度、最低的脆度, 而真空冷冻干燥的苹果干硬度最低、脆度较高; 在色差方面, 真空冷冻干燥苹果干的 L^* 值最高 (72.91±0.59), ΔE 值最接近鲜样 (10.48±0.30); 此外, 真空冷冻干燥能有效降低苹果干中抗氧化物质的损失, 与鲜样相比, 其抗坏血酸、总酚和总黄酮的含量分别降低了 35.22%、39.27% 和 32.02%。同时, 总抗氧化能力、羟自由基清除率和超氧阴离子清除率也分别降低了 23.50%、57.24% 和 10.56%; 在微观结构方面, 真空冷冻干燥的苹果干细胞层呈较规律的海绵状多孔性结构, 质地较好; 在风味方面, 鉴定出 5 种干燥方式的苹果干有 96 种挥发性物质, 其中真空冷冻干燥的苹果干更加芳香、口感更加丰富。综合考虑, 真空冷冻干燥是提高苹果干零食品质特性和风味的推荐方法, 对苹果干制品的工业化生产有现实的指导意义。

关键词: 干燥方式, 苹果干, 抗氧化活性, 气相离子迁移谱, 挥发性风味

中图分类号: TS206.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)17-0221-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090258



本文网刊:

Effects of Drying Methods on Quality Characteristics and Flavor of Dried Apples

SONG Juan^{1,2}, ZHANG Haiyan¹, ZENG Chaozhen¹, YUAN Jing¹, MU Yuwen¹, KANG Sanjiang^{1*}, WEN Pengcheng^{2,*}

(1. Agricultural Product Storage and Processing Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate the processing methods that could improve the quality of Jingning dried apple snacks, the effects of five drying methods (hot air drying, solar drying, vacuum freeze drying, microwave-pressure puffing drying, and heat pump drying) on energy consumption, antioxidant activity, microstructure, and flavor of dried apples were studied. The results showed that compared with the other four drying methods, in terms of energy consumption that vacuum freeze drying had the highest unit energy consumption (69.48±1.69 kW·h/kg), while solar drying had the lowest unit energy consumption (19.60±1.36 kW·h/kg). In terms of hardness and crispness, dried apples that were dried by hot air drying were found to have the highest levels of hardness and lowest levels of crispness, while those that were dried by vacuum freeze

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 甘肃省科技计划项目 (23JRRA1792); 国家苹果产业技术体系 (CARS-27-2024); 甘肃省农业农村厅科技项目 (GNKJ-2018-9); 甘肃省科技重大专项 (22ZD6NA045)。

作者简介: 宋娟 (1988-), 女, 博士研究生, 研究方向: 营养与食品安全, E-mail: songjuan88126@126.com。

* 通信作者: 康三江 (1977-), 男, 本科, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏加工技术, E-mail: kang58503@163.com。

文鹏程 (1982-) (ORCID: 0000-0002-4521-4067), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: wenpch@126.com。

drying were found to have the lowest levels of hardness and a higher degree of crispness. In terms of colour difference, vacuum freeze drying had the highest L^* value (72.91 ± 0.59) and the ΔE value was closest to the fresh samples (10.48 ± 0.30). In addition, compared with fresh samples, vacuum freeze drying effectively slowed down the loss of antioxidant activity of dried apples, with the contents of ascorbic acid, total phenols and total flavonoids decreased by 35.22%, 39.27% and 32.02%, respectively. Meanwhile, the total antioxidant capacity, hydroxyl radical scavenging rate and superoxide anion scavenging rate decreased by 23.50%, 57.24% and 10.56%, respectively. In terms of microstructure, the cell layer of dried apples with vacuum freeze drying preserved a regular sponge-like porous structure with good texture. In terms of flavor, 96 volatile substances were identified in five types of dried apples, while it made the dried apples with vacuum freeze drying more aromatic and richer in taste. In conclusion, vacuum freeze drying is recommended as a method to improve the quality and flavor of high-quality dried apples, and provides significance in guiding the industrialized production of dried apple products.

Key words: drying method; dried apple; antioxidant activity; gas chromatography ion mobility spectrometry; volatile flavors

静宁苹果是一种富含钾、锌、有机酸、维生素C等生物活性成分的水果,比其它地区苹果口感偏酸甜,果香更浓郁,静宁苹果品牌先后获得国家地理标志产品保护、中国驰名商标等8张国家级名片^[1],逐渐受到消费者青睐。据报道,2021年甘肃省平凉市静宁县的静宁苹果总产量达98.6万t,实现产值60亿元,果品收入占全县农民人均纯收入的70%以上^[2]。然而,由于静宁苹果含水量高、糖分高,采收后易损坏腐烂,难以贮藏,保质期短,极大地制约了苹果产业的发展。为了解决这个问题,苹果干制加工成为了降低苹果采后品质劣变的重要途径。但是,传统的苹果干多半是晾晒与燃煤烧柴干燥制成,这不仅耗费较大的人力成本,也无法保障食品安全^[3-4]。因此,选择合适的干燥技术和设备,以提高苹果干制品的营养品质和安全性是苹果行业面临的重要问题。

国内外学者对苹果干的制作工艺进行了广泛研究,主要集中在单一或联合干燥条件下苹果干制品的工艺参数和干燥特性等方面。其中,热风干燥、太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波-压差膨化干燥和热泵干燥等方法被广泛运用于苹果干的制作。热风干燥是一种最常用的干燥方法,具有干燥速率快^[5]、操作简便、投资较低和易于实现工业化^[6-7]等优点。然而,热风干燥的干燥周期较长,对苹果的色泽和风味可能会有一定影响^[8-9]。太阳能干燥具有成本效益低,干燥效率高、环保等优点,适用于低温和高流量干燥^[10-11]。然而,太阳能干燥受天气和环境因素影响较大,可能影响苹果干的干燥效果和品质。真空冷冻干燥能够保持苹果原有形状、颜色、营养成分,呈现良好的品质和口感^[12]。然而,真空冷冻干燥的耗时长,能耗较高^[13]。微波干燥具有干燥速度快、节能高效等优点^[14]。然而,微波干燥设备投资较高,且对物料有一定的局限性^[15-16]。膨化干燥能够提高物料的体积和重量,降低干燥时间^[17]。然而,膨化干燥可能会导致物料形状和结构的变化^[18-19]。热泵干燥具有节能、环保、高效等优点^[20-21]。然而,热泵干燥的投资和运行成本较高。针对以上各种干燥方法对静宁苹果的能耗、品质和风味等的影响尚未研究透彻。

在前期研究的基础上,本实验以静宁苹果为试材,对5种不同的干燥方法(热风干燥、太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波-压差膨化干燥和热泵干燥)进行全面评估,从能耗、色差、抗氧化活性、微观结构、风味等多个物理特性指标来衡量各种干燥方法的效果。本研究旨在找到一种保持苹果干的营养价值和口感的干燥方法,为高质量苹果干的产业化提供技术指导,为苹果相关的保健食品和功能性产品的研究提供一定的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

静宁苹果 ‘长富二号’,产自甘肃省平凉市静宁县;D-异抗坏血酸钠 食品级,合肥盛润生物制品有限公司;丙酮、没食子酸、草酸、无水乙醇 分析纯,无锡一鸣环保科技有限公司;碳酸钠、硝酸钠、乙酸、乙酸钠、邻苯三酚、水杨酸 分析纯,天津市鼎盛鑫化工有限公司。

SC-100型色差计 北京康光光学仪器有限公司;HG303-4型恒温干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;太阳能干燥装置 课题组自制;Scientz-10ND真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技有限公司;GWM-15B微波干燥 天水华园制药设备科技有限责任公司;QDPH1001型果蔬压差膨化干燥 天津市勤德新材料科技有限公司;WRH-100TB1S热泵干燥 广东威而信实业有限公司;UV5100可见分光光度计 上海光谱仪器有限公司;TGL-20型冷冻离心机 长沙湘仪离心机仪器有限公司;TA.HD plus物性测试仪 英国 Stable Micro System 公司;JSM-6701F扫描电镜 日本电子光学公司;FlavourSpec[®]风味分析仪 德国 GAS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 苹果预处理 静宁苹果首先清洗、切分2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm的苹果块,然后用0.3%D-异抗坏血酸钠溶液护色30 min,最后分别进行不同干燥处理,每组干燥处理样本量为1 kg,每组3次重复,收集样品备用。

1.2.2 干燥条件

1.2.2.1 热风干燥 设定温度 45 ℃,每次测水分时间间隔 30 min,干基水分低于 7%±0.83%时结束干燥。

1.2.2.2 太阳能干燥 课题组自制设备^[11],设定温度为 25~45 ℃,每次测水分时间间隔 30 min,干基水分低于 7%±0.83%时结束干燥。

1.2.2.3 真空冷冻干燥 首先苹果干置于-80 ℃冰箱预冷 12 h,预冷结束后将其置于真空冷冻干燥机中,冷阱温度-59.3~-60.4 ℃,真空度 1.0 Pa,干基水分低于 7%±0.83%时结束干燥。

1.2.2.4 微波-压差膨化干燥 首先设定 0.60 kW 微波功率将物料干燥至原质量的 30%,然后转入 45 ℃压差膨化罐,干基水分低于 7%±0.83%时结束干燥。

1.2.2.5 热泵干燥 设定温度 45 ℃,湿度 12%,风速 2.0 m/s,每次测水分时间间隔 30 min,干基水分低于 7%±0.83%时结束干燥。

1.2.3 指标测定方法

1.2.3.1 水分含量 参考中华人民共和国国家标准 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定苹果干的干基含水量^[22],通过公式(1)计算:

$$M_t(\text{g/g}) = \frac{W_t - G}{G} \quad \text{式(1)}$$

式中: M_t 是水分含量, g/g; W_t 是干燥 t 时刻的总质量, g; G 是干物质质量, g。

1.2.3.2 干燥能耗 参考 MASZTALERZ 等^[23]的方法,通过测定干燥用时,计算干燥能耗,通过公式(2)计算:

$$E(\text{kW} \cdot \text{h/kg}) = \frac{P \times t}{m} \quad \text{式(2)}$$

式中: E 是干燥能耗, kW·h/kg; P 是有效功率, kW; t 是干燥用时, h; m 是样品质量, kg。

1.2.3.3 质构特性 采用质构分析仪^[24]测定苹果干的硬度和脆度,设置测试条件为:采用 P/36R 型探头,前期测试速度 2.0 mm/s,检测中速度 1.0 mm/s,后期检测速度 10.0 mm/s,其中最大断裂力定义为样品硬度,以测试中产生的距离为脆度,距离越小,脆度越大,反之脆度越小;每个处理取 10 次重复,去除最大值和最小值后取平均值。

1.2.3.4 色差 采用自动色差仪^[25]测定样品的颜色,每次测量 10 次重复,基于 L^* 、 a^* 和 b^* 的测量值通过公式(3)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式(3)}$$

式中: L^* 、 a^* 和 b^* 是干燥样品的色差; L_0 、 a_0 和 b_0 是鲜样色差。

1.2.3.5 抗坏血酸含量 参照中华人民共和国国家

标准 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》^[26]。

1.2.3.6 总酚含量 总酚的提取参考宋娟等^[25]和 CIURZYNSKA 等^[27]的方法并改进:称取 1 g 干样(或 2 g 鲜样),将其置于试管中,加入乙醇浸提液(1 mL)获得总酚提取液样品,然后将其与福林酚试剂(1 mL)充分混合。将混合物在 25 ℃下孵育 10 min 后,向每个样品中加入 7.5%的 Na_2CO_3 溶液(3 mL)和蒸馏水(5 mL)。将混合物转移至 40 ℃水浴中放置 20 min,以促进颜色稳定。从水浴中取出试管,用光密度计在 765 nm 波长下测定光密度值,每次测量 3 次重复。

1.2.3.7 总黄酮含量 参考宋娟等^[25]和邢晓凡等^[28]的方法并改进,吸取上述总酚提取液样品(1 mL)依次加入 70%乙醇溶液(2 mL)、5% NaOH 溶液(0.75 mL)、10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液(0.5 mL),混匀后静置 5 min。再加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液(4 mL),在波长 510 nm 处测定光密度值,每次测量 3 次重复。

1.2.3.8 总抗氧化能力 参考宋娟等^[25]和李翠霞^[29]的方法并改进,将浓度为 30 mmol/L 的醋酸缓冲液(pH3.6),20 mmol/L 的氯化铁和 10 mmol/L 的 TPTZ(溶于 40 mmol/L 的 HCl)以 10:1:1(v/v/v)的比例混合,在 37 ℃温度下水浴加热 5 min,制备成 FRAP 试剂。吸取上述总酚提取液样品(1 mL)放于 1.5 mL 离心管中,加入新鲜制备的 FRAP 试剂(900 μL)与蒸馏水(30 μL)和总酚提取液样品(30 μL)混合,37 ℃保持 30 min,使用分光光度计测定 593 nm 光密度值,每次测量 3 次重复。

1.2.3.9 羟自由基清除率 参考张翔等^[30]的方法并改进,吸取上述总酚提取液样品(1 mL),依次加入 6 mmol/L 硫酸亚铁(FeSO_4)(1 mL)、过氧化氢(H_2O_2 , 1 mL),混匀后静置 10 min,再加入 6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液(1 mL)和蒸馏水(10.5 mL),混匀,37 ℃静置 30 min,测定 510 nm 光密度值,每次测量 3 次重复。通过公式(4)计算:

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_x - A_{x_0})}{A_0} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中: A_x 是样品光密度值; A_0 是对照组光密度值; A_{x_0} 是不加 H_2O_2 光密度值。

1.2.3.10 超氧阴离子清除率 参考张小燕等^[31]的方法并改进,吸取上述总酚提取液样品(1 mL)加入 pH8.0 的 Tris-HCl(4.5 mL)和蒸馏水(4.2 mL)混匀,在水浴(25 ℃)静置 20 min,然后加入 2.5 mmol/L 邻苯三酚(0.3 mL)混匀,反应 5 min,立即加入 2 滴 8.0 mol/L HCl 终止反应,测定 325 nm 光密度值,每次测量 3 次重复。通过公式(5)计算:

$$\text{超氧阴离子清除率}(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中: A_0 是邻苯三酚的氧化速率; A 是加入总酚

样液后邻苯三酚的氧化速率。

1.2.3.11 微观结构 采用放大 200 倍的扫描电镜观察不同样品的组织形态^[31]。

1.2.3.12 挥发性风味物质 采用 Flavour Spec[®]气相离子迁移谱联用仪^[32]测定,将 IMS 数据库里相应挥发性化合物的标准曲线作为参考基准,一一对应测定样品挥发性化合物的种类及含量的定性定量分析。

顶空进样条件:准确称量 1.0 g 干样(2.0 g 鲜样)粉末于 20 mL 顶空进样瓶中,40 °C、500 r/min 孵育 15 min。

GC-IMS 条件:色谱柱为 FS-SE-54-CB-1(15 m)毛细管柱(0.53 mm),载气为 99.999% 高纯氦气,流速为 150 mL/min。色谱分析的操作参数如下:60 °C 柱温保持 30 min,初始 2 mL/min,保持 2 min 后在 8 min 内增至 10 mL/min,接着 10 min 内增至 150 mL/min。

1.2.4 感官评价 参考马有川^[12]的感官评价方法并改进,组织 30 名品评人员对 5 种干燥处理的苹果干样品进行评定和打分(表 1, 100 分满分)。

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	分数	评分标准
色泽	1~8	与原料的色泽不一致,褐变严重,颜色不均匀
	9~15	与原料的色泽不一致,褐变较严重,颜色均匀
	16~20	与原料的色泽相近或者接近一致,淡黄色,颜色均匀
香味	1~10	苹果味寡淡,难以接受
	11~24	苹果味一般,可以接受
	25~30	具有苹果特有的香味,香味浓厚纯正
口感	1~10	较硬,不酥脆
	11~24	较为酥脆
	25~35	非常酥脆
组织形态	1~6	表面不均匀,皱缩,边缘破损,有黏结
	7~12	表面不均匀,较皱缩,边缘卷曲,无黏结
	13~15	表面均匀平整,无卷曲,无黏结

1.3 数据处理

所有实验 3 次重复,使用 SPSS 22.0 分析相对标准误差、平均值和显著性($P<0.05$),采用 Origin 8.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对苹果干理化性质和生物活性成分的影响

2.1.1 能耗方面 由表 2 可知,从干燥时间来看,真空冷冻干燥时间最长,而微波-压差膨化干燥和热泵干燥时间较短,真空冷冻干燥时间约是热泵干燥的 4.5 倍,表明真空冷冻干燥效率相对较低。从单位能耗来看,真空冷冻干燥>热风干燥>微波-压差膨化干燥>热泵干燥>太阳能干燥,太阳能干燥比真空冷冻干燥节能约 71.79%。在 5 种干燥方式中,和真空冷冻干燥的苹果干相比,微波-压差膨化干燥和热泵干

燥的分别节约能耗 64.90%、68.71%,这与 JIANG 等^[33]的研究结果类似,可能是因为真空冷冻干燥过程包括冷冻、真空和加热三个阶段比较耗时耗能;而热风在常压下干燥耗时较长,耗能较高;太阳能的能源成本低、环保可持续,单位能耗最低;微波-压差膨化干燥速率快,耗能较低;热泵干燥过程可以实现环境热量回收循环,从而降低能耗。

表 2 干燥时间与能耗情况

Table 2 Drying time and energy consumption

干燥方式	干燥时间(h)	单位能耗(kW·h/kg)
热风干燥	12.47±0.49 ^c	36.96±1.54 ^b
太阳能干燥	16.63±0.51 ^b	19.60±1.36 ^d
真空冷冻干燥	25.21±0.27 ^a	69.48±1.69 ^a
微波-压差膨化干燥	6.54±0.61 ^d	24.39±1.73 ^c
热泵干燥	5.61±0.35 ^d	21.74±1.49 ^d

注:数值表示平均值±标准偏差;同列不同字母表示差异显著($P<0.05$);表3~表5、表8同。

2.1.2 硬度和脆度 由表 3 可知,不同干燥方式的苹果干硬度从大到小依次是:热风干燥>太阳能干燥>热泵干燥>微波-压差膨化干燥>真空冷冻干燥,脆度从大到小依次是:微波-压差膨化干燥>真空冷冻干燥>热泵干燥>太阳能干燥>热风干燥。这可能是因为热风干燥导致苹果内部的水分迁移到表面,形成一层硬壳,从而使苹果干的硬度增加。然而,这种快速的水分迁移可能没有足够的时间让苹果内部结构调整,导致脆度下降;太阳能干燥的速度较慢,可能需要更长的时间才能达到理想的干燥效果,从而增加了苹果干的硬度,降低了脆度;热泵干燥利用热泵技术将空气加热,并通过空气循环来去除苹果中的水分,这种干燥方式相对较快,使其硬度相对较低,并保持了一定的脆度;微波-压差膨化干燥能够使苹果内部的水分迅速转化为蒸汽,而压差能够快速去除苹果中的水分,能够较好地保持苹果干的内部结构,因此其硬度相对较低,同时因为水分的迅速蒸发,苹果干的脆度较高;真空冷冻干燥是将苹果在低温和真空条件下干燥,较好地保持苹果干的形状和内部结构,因此其硬度相对较低,但脆度相对较高。这与鲜枣^[34]和草莓^[35]的研究类似。结果表明,真空冷冻干燥和微波-压差膨化干燥产品的硬脆度适中,较好地满足消费者喜好。

表 3 不同干燥方式对苹果干硬度和脆度的影响

Table 3 Effects of different drying methods on the hardness and crispness of dried apples

干燥方式	硬度(N)	脆度(mm)
热风干燥	778.34±34.60 ^a	1.32±0.19 ^a
太阳能干燥	619.41±49.17 ^b	1.26±0.14 ^{ab}
真空冷冻干燥	237.38±52.01 ^c	0.81±0.27 ^c
微波-压差膨化干燥	384.53±49.35 ^d	0.69±0.13 ^d
热泵干燥	502.79±44.13 ^c	1.05±0.22 ^b

2.1.3 色差 从表 4 可以看出,5 种干燥方式的苹果

干均发生不同程度的褐变。其中,真空冷冻干燥样品 L^* 值最大(72.91±0.59), ΔE 值最小(10.48±0.30), 颜色最接近鲜样,表明真空冷冻干燥可较好地保持苹果原有色泽。其它 4 种干燥方式的 b^* 值、 ΔE 值均较高,热泵干燥样品 b^* 值最高(37.35±0.35), ΔE 值最高(23.49±0.51),表明色泽较暗、偏黄。这与‘美红’苹果片^[31]的研究结果一致,可能是由于苹果干在高温条件下加速酶促褐变和美拉德反应,而真空冷冻干燥是在低温和真空条件的干燥,能够有效地防止热敏性物质的分解,避免了氧化褐变的产生,同时也能较好地保留苹果原有的颜色和口感。综上所述,真空冷冻干燥可较好地保持苹果原有色泽,较好地满足了消费者的喜好。

表 4 不同干燥方式对苹果干色差的影响
Table 4 Effects of different drying methods on the color difference of dried apples

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
鲜样	78.37±0.39 ^a	4.73±0.26 ^d	20.58±0.42 ^d	-
热风干燥	60.22±0.60 ^d	13.61±0.19 ^a	30.84±0.36 ^c	22.67±0.25 ^a
太阳能干燥	64.71±0.47 ^c	12.43±0.14 ^b	34.47±0.44 ^b	20.94±0.41 ^b
真空冷冻干燥	72.91±0.59 ^b	8.54±0.27 ^c	28.68±0.39 ^e	10.48±0.30 ^c
微波-压差膨化干燥	62.93±0.43 ^d	14.12±0.13 ^a	30.63±0.40 ^c	20.66±0.26 ^b
热泵干燥	65.15±0.51 ^c	13.53±0.22 ^a	37.35±0.35 ^a	23.49±0.51 ^a

2.1.4 抗氧化活性 抗坏血酸、总酚、总黄酮、总抗氧化能力、羟自由基清除率、超氧阴离子清除率都与抗氧化活性有关,反映生物体在面对氧化应激时的防御能力或某物质对抗氧化的能力。从表 5 可以看出,5 种干燥方式对苹果干的抗坏血酸、总酚、总黄酮、总抗氧化能力、羟自由基清除率、超氧阴离子清除率均存在显著影响($P<0.05$)。结果发现,真空冷冻

干燥和微波-压差膨化干燥苹果干的抗氧化活性表现较好,而热风干燥、太阳能干燥和热泵干燥苹果干则表现相对较差。和鲜样相比,微波-压差膨化干燥和真空冷冻干燥苹果干的抗坏血酸含量分别损失了 26.57%、35.22%,而太阳能干燥苹果干的抗坏血酸含量损失了 50.39%;同时,热风干燥、太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波-压差膨化干燥和热泵干燥的苹果干总酚含量分别损失了 52.67%、66.43%、39.27%、50.06% 和 55.46%,总黄酮含量分别损失了 50.96%、55.07%、32.02%、24.73% 和 42.92%。此外,5 种干燥方式也导致了苹果干总抗氧化能力、羟自由基清除率和超氧阴离子清除率的损失。具体而言,热风干燥、太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波-压差膨化干燥和热泵干燥的苹果干总抗氧化能力分别损失了 43.26%、50.23%、23.50%、32.82%、39.92%,羟自由基清除率分别损失了 87.52%、91.70%、57.24%、72.41% 和 89.90%,超氧阴离子清除率分别降低了 32.81%、34.50%、10.56%、12.76% 和 22.47%。这与石榴^[36]和菠萝^[37]的研究类似,可能是因为热风干燥在高温下进行,加快了水分的蒸发,但也可能导致苹果中的抗氧化活性损失。太阳能干燥依赖太阳能,过程较慢且温度波动可能导致抗氧化成分分解或氧化。热泵干燥原理与热风干燥相似,速度较慢且设备投资高。真空冷冻干燥在低温下进行,能防止热敏性物质分解,保留物料原有颜色和口感,使苹果干保留了最高的抗氧化活性。微波-压差膨化干燥结合微波和压差膨化技术,能快速加热并使物料内部水分汽化,同时使物料瞬间膨胀,增大比表面积,加快水分蒸发速度,较好地保留苹果干中的较高的抗氧化活性。综上所述,真空冷冻干燥是保持苹果干抗氧化性能较好的干燥方式。

表 5 不同干燥方式对苹果干抗氧化指标的影响

Table 5 Effects of different drying methods on antioxidant indexes of dried apples

干燥方式	抗坏血酸(μg/g)	总酚(mg/g)	总黄酮(mg/g)	总抗氧化能力(μmol Trolox/g)	羟自由基清除率(%)	超氧阴离子清除率(%)
鲜样	2841.48±30.60 ^a	16.86±0.60 ^a	11.93±0.28 ^a	30.56±0.84 ^a	15.55±0.64 ^a	90.33±1.60 ^a
热风干燥	1534.18±25.04 ^c	7.98±0.83 ^{bc}	5.85±0.36 ^c	17.34±0.75 ^d	1.94±0.78 ^d	60.69±2.82 ^c
太阳能干燥	1409.52±16.72 ^d	5.66±0.69 ^d	5.36±0.25 ^d	15.21±0.64 ^e	1.29±0.60 ^e	59.17±4.59 ^c
真空冷冻干燥	1840.63±23.59 ^b	10.24±0.74 ^b	8.11±0.38 ^{ab}	23.38±0.73 ^b	6.65±0.55 ^b	80.79±5.60 ^b
微波-压差膨化干燥	2086.46±31.52 ^b	8.42±0.58 ^b	8.98±0.27 ^b	20.53±0.81 ^c	4.29±0.62 ^c	78.81±5.83 ^b
热泵干燥	1558.11±38.71 ^c	7.51±0.79 ^c	6.81±0.31 ^c	18.36±0.79 ^d	1.57±0.57 ^e	70.03±7.60 ^b

表 6 相关性分析

Table 6 Correlation analysis

指标	总酚	总黄酮	抗坏血酸	总抗氧化能力	羟自由基清除率	超氧阴离子清除率
总酚	1.00					
总黄酮	0.871 [*]	1.00				
抗坏血酸	0.742	0.837	1.00			
总抗氧化能力	0.969 [*]	0.856 [*]	0.921 [*]	1.00		
羟自由基清除率	0.801	0.946 [*]	0.751	0.824	1.00	
超氧阴离子清除率	0.834	0.957 [*]	0.896	0.813	0.870	1.00

注: *表示在0.05水平显著相关。

2.1.5 相关性分析 采用 SPSS 22.0 软件对苹果干的抗氧化活性进行相关性分析,探讨苹果干的总酚、总黄酮、抗坏血酸等成分与其抗氧化活性之间的联系,相关性系数的绝对值越大,说明两个指标之间的相关性越强。由表 6 可知,苹果干的总酚含量、抗坏血酸含量均与总抗氧化能力呈显著正相关,总黄酮含量与其总抗氧化能力、羟自由基清除率以及超氧阴离子清除率均呈显著正相关($P<0.05$)。其中,苹果干的总酚含量与其总抗氧化能力之间展现出极强的相关性,相关系数高达 0.969。这意味着苹果干的总酚含量越高,其总抗氧化能力也就越高。此外,抗坏血酸含量和总黄酮含量与其总抗氧化能力之间的相关系数分别为 0.921 和 0.856,虽然略低于总酚含量的相关性,但依然表明了它们与总抗氧化能力之间存在着显著的正相关关系。结果表明,苹果干中的总酚、总黄酮和抗坏血酸等抗氧化物质含量的增加,可以显著提高苹果干的抗氧化活性。这些成分在苹果干中具有显著的抗氧化作用,能够有效地保护细胞免受氧化应激的损伤。

2.2 不同干燥方式对苹果干微观结构的影响

通过放大 200 倍的扫描电镜观察,结果表明,新鲜苹果干的组织由大量连接紧密且形状规则的细胞区室和细胞间隙构成,细胞大小相对一致(图 1A),然而不同干燥处理的苹果组织逐渐出现明显的微观结构变形,组织间空隙大小不一,导致苹果干口感与质地的不同。例如,热风 and 太阳能干燥苹果干的细胞间几乎没有空隙,细胞结构排列致密,表现出较大程度的弯曲和明显的结构变形现象,这可反映出热风、太阳能干燥的苹果干硬度较大,同时细胞收缩、组织变

形等也会导致部分抗氧化物质的损失(图 1B、C);真空冷冻干燥产品较好地保留苹果干的原有结构,细胞层呈较规律的海绵状多孔性结构,质地较好(图 1D)。这与亚洲梨^[38]和杨桃^[39]的研究结果类似,由于低温下抗氧化物质移动速度慢,营养成分流失较少,减少了氧化应激的发生,从而使得真空冷冻干燥处理的苹果干总酚、总黄酮含量较高,抗氧化活性较强;而微波-压差膨化干燥由于微波的穿透性,苹果干的组织结构破坏较剧烈,细胞呈现杂乱排离,稍有变形,但该干燥过程的样品较酥脆,内部水分迅速扩散至表面,最大限度地保留抗氧化物质(图 1E);然而,在热泵干燥的作用下,苹果组织细胞壁以扁平化和过度收缩为特征,这引起了抗氧化物质的损失,宏观上表现为苹果干硬化,这与热风干燥、太阳能干燥的硬脆度结果一致(图 1F)。综上所述,不同的干燥处理对苹果干的微观结构和抗氧化物质含量有显著影响。真空冷冻干燥处理能够较好地保留苹果的原有的结构,细胞形态和结构特征的差异间接地影响苹果干中总酚、总黄酮等抗氧化物质的含量和分布,从而影响其抗氧化活性。

2.3 不同干燥方式对苹果干挥发性物质的影响

2.3.1 挥发性物质的定性分析 从表 7 可以看出,5 种干燥方式的苹果干挥发性风味物质含量和种类存在显著差异($P<0.05$),共鉴定出 96 种挥发性风味物质,其中已知成分 50 种,包括 25 种酯类、7 种醇类、12 种醛类、5 种酮类和 1 种酸类,各风味成分相互作用形成不同的风味。从相对含量看,真空冷冻干燥的酯类物质相对含量最高为 41.48%、酮类物质相对含量最高为 29.31%,微波-压差膨化干燥的醛类物

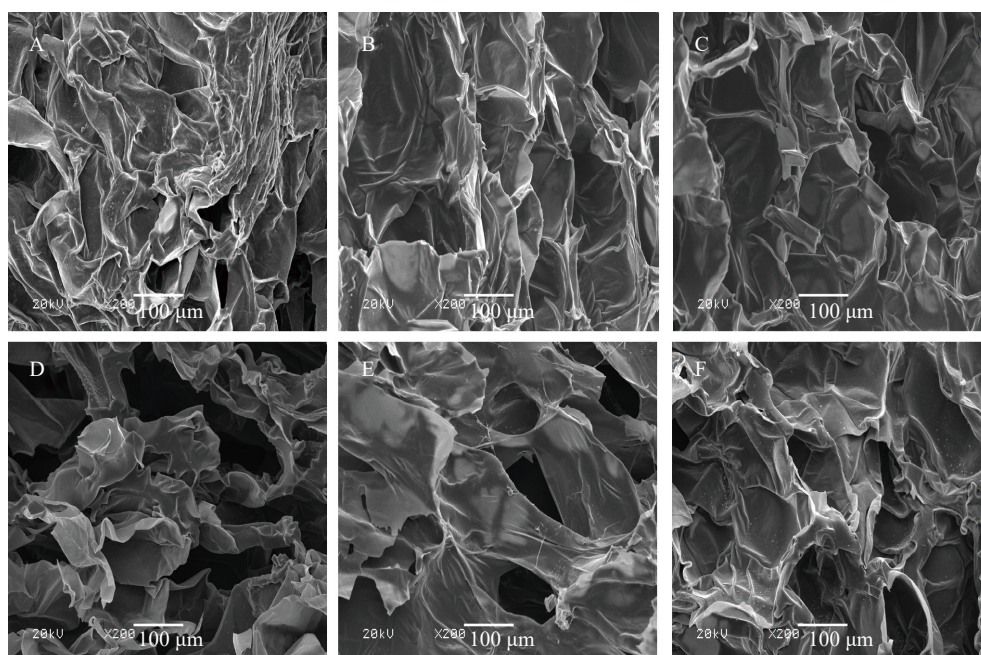


图 1 不同干燥方式对苹果干微观结构的影响

Fig.1 Effects of different drying methods on the microstructure of dried apples

注: (A)鲜样; (B)热风干燥; (C)太阳能干燥; (D)真空冷冻干燥; (E)微波-压差膨化干燥; (F)热泵干燥。

表 7 不同干燥方式苹果干挥发性物质 GC-IMS 定性分析结果

Table 7 Results of GC-IMS qualitative analysis of volatile substances in dried apples with different drying methods

组分	CAS号	分子式	保留时间(s)	挥发性物质相对含量(%)						备注	
				鲜样	热风干燥	太阳能干燥	真空冷冻干燥	微波-压差膨化	热泵干燥		
1	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	618.8	2.29	3.96	4.09	3.09	3.25	0.85	单体
2	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	617.2	1.21	4.56	4.14	3.53	0.9	0.99	二聚体
3	乙酸丁酯	C123864	C ₆ H ₁₂ O ₂	291.581	1.42	1.26	1.28	2	1.13	0.67	单体
4	乙酸丁酯	C123864	C ₆ H ₁₂ O ₂	293.304	1.89	0.27	0.23	0.28	0.92	0.82	二聚体
5	2-甲基丁酸乙酯	C7452791	C ₇ H ₁₄ O ₂	326.891	9.8	0.19	0.22	0.13	1.23	0.72	单体
6	2-甲基丁酸乙酯	C7452791	C ₇ H ₁₄ O ₂	320.638	8.81	0.32	0.3	1.33	0.57	0.33	二聚体
7	丁酸己酯	C2639636	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	985.494	1.62	0.66	0.73	0.64	0.92	0.85	单体
8	丁酸己酯	C2639636	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	10981.258	7.05	1.22	0.37	0.84	2.05	1.04	二聚体
9	乙酸2-甲基丁酯	C624419	C ₇ H ₁₄ O ₂	355.096	1.87	0.23	0.3	0.18	0.9	0.18	二聚体
10	乙酸2-甲基丁酯	C624419	C ₇ H ₁₄ O ₂	356.933	2.61	0.49	0.37	0.24	1.4	1.99	单体
11	2-甲基丁酸丁酯	C15706737	C ₉ H ₁₈ O ₂	614.783	3.67	0.79	0.59	0.62	1.64	0.64	单体
12	2-甲基丁酸丁酯	C15706737	C ₉ H ₁₈ O ₂	610.114	3.49	0.9	0.99	1.00	1.07	1.09	二聚体
13	酯类 异丁酸乙酯	C97621	C ₆ H ₁₂ O ₂	224.845	2.88	0.2	0.25	0.23	0.23	0.24	
14	丙烯酸乙酯	C140885	C ₅ H ₈ O ₂	183.915	0.15	1.29	0.59	10.25	2.08	5.29	
15	巴豆酸乙酯	C623701	C ₆ H ₁₀ O ₂	309.27	7.52	6.02	0.78	0.48	3.93	0.55	单体
16	巴豆酸乙酯	C623701	C ₆ H ₁₀ O ₂	314.386	3.86	0.23	0.24	0.22	0.95	0.23	二聚体
17	己酸乙酯	C123660	C ₈ H ₁₆ O ₂	578.668	2.72	0.7	0.5	0.48	2.51	0.57	单体
18	己酸乙酯	C123660	C ₈ H ₁₆ O ₂	577.327	5.62	0.88	0.8	0.71	1.67	0.71	二聚体
19	戊酸乙酯	C539822	C ₇ H ₁₄ O ₂	383.732	2.62	0.72	0.52	0.52	1.07	2.02	
20	丙酸乙酯	C105373	C ₅ H ₁₀ O ₂	193.382	2.97	0.07	0.07	0.07	0.46	0.88	二聚体
21	2-糠酸甲酯	C611132	C ₆ H ₆ O ₃	513.714	1.12	2.57	5.51	7.26	2.33	9.13	
22	2-甲基丁酸甲酯	C868575	C ₆ H ₁₂ O ₂	242.108	4.55	1.03	3.18	3.73	0.58	1.98	单体
23	2-甲基丁酸甲酯	C868575	C ₆ H ₁₂ O ₂	241.551	2.89	0.21	0.24	0.23	0.82	0.2	二聚体
24	乙酸甲酯	C79209	C ₃ H ₆ O ₂	118.609	5.42	2.3	2.26	3.34	0.65	3.67	
25	丁酸甲酯	C623427	C ₅ H ₁₀ O ₂	200.621	2.92	1.13	0.09	0.08	0.89	0.4	
	合计				90.97	32.2	28.64	41.48	34.15	36.04	
26	糠醛	C98011	C ₅ H ₄ O ₂	312.423	0.58	4.22	1.79	0.92	9.71	0.77	单体
27	糠醛	C98011	C ₅ H ₄ O ₂	313.962	1.22	0.62	0.65	0.16	7.17	0.17	二聚体
28	乙缩醛	C105577	C ₆ H ₁₄ O ₂	207.025	5.8	0.6	0.45	0.43	0.34	2.38	
29	(E)-2-庚烯醛	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	471.37	20.7	0.76	0.69	0.79	1.37	0.7	单体
30	(E)-2-庚烯醛	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	469.358	9.81	1.18	1.27	1.16	1.28	1.31	二聚体
31	醛类 2-甲基丁醛	C96173	C ₅ H ₁₀ O	167.406	2.74	1.03	0.78	0.9	9.05	1.5	二聚体
32	2-甲基丁醛	C96173	C ₅ H ₁₀ O	167.956	0.7	1.37	1.26	1.52	10.05	2.09	单体
33	异戊醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	161.905	0.11	1.68	0.84	13.23	1.47	2.68	二聚体
34	异戊醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	163.005	0.26	1.97	1.75	8.1	2.1	1.83	单体
35	丁醛	C123728	C ₄ H ₈ O	125.708	2	1.26	0.83	1.5	6.77	1.63	二聚体
36	丁醛	C123728	C ₄ H ₈ O	126.877	1.34	1.34	1.29	1.81	4.15	2.07	单体
37	己醛	C66251	C ₆ H ₁₂ O	266.177	0.56	1.55	0.99	1.38	2.13	6.39	
	合计				45.82	17.58	12.59	31.9	55.59	23.52	
38	乙醇	C64175	C ₂ H ₆ O	107.815	9.95	3.42	6.77	5.15	0.52	1.2	
39	2-甲基丁醇	C137326	C ₅ H ₁₂ O	219.989	3.38	1.2	0.61	2.54	0.49	3.79	单体
40	2-甲基丁醇	C137326	C ₅ H ₁₂ O	218.28	2.29	0.38	0.13	0.12	0.12	1.96	二聚体
41	醇类 1-戊烯-3-醇	C616251	C ₅ H ₁₀ O	179.182	0.25	8.07	8.96	1.51	1.17	10.04	
42	异丁醇	C78831	C ₄ H ₁₀ O	152.248	1.17	1.58	1.67	1.27	8.27	11.05	
43	3-庚醇	C589822	C ₇ H ₁₆ O	362.701	8.17	0.45	0.38	3.33	0.37	0.31	
44	3-甲基-1-戊醇	C589355	C ₆ H ₁₄ O	319.502	9.05	0.18	0.16	0.15	0.29	0.17	
	合计				34.26	15.28	18.68	14.07	11.23	28.52	
45	2,3-丁二酮	C431038	C ₄ H ₆ O ₂	134.646	0.56	7.91	8.2	13.7	8.18	6.95	
46	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	181.409	5.13	0.89	1.09	0.84	0.66	1.39	
47	酮类 甲基庚烯酮	C110930	C ₈ H ₁₄ O	550.034	2.66	0.87	0.86	0.7	1.93	8.98	
48	3-羟基-2-丁酮	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	208.572	1.15	4.65	4.63	5.11	0.9	1.56	单体
49	3-羟基-2-丁酮	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	205.16	1.61	5.19	3.27	8.96	0.26	5.71	二聚体
	合计				11.11	19.51	18.05	29.31	11.93	24.59	
50	酸类 乙酸	C64197	C ₂ H ₄ O ₂	138.287	2.97	4.6	5.67	5.51	8.58	6.66	

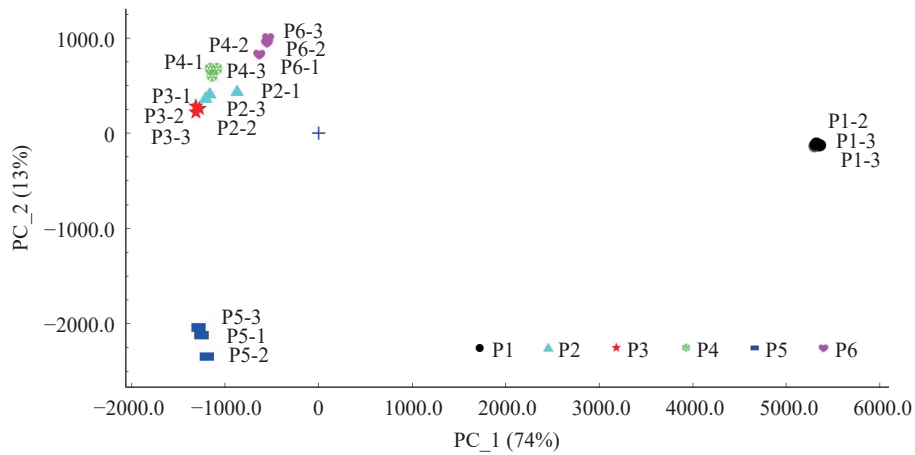


图 3 不同干燥方式对苹果干挥发性物质的主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of dried apples volatile substances with different drying methods

的增加可能会使苹果干更加芳香, 口感更加丰富, 并提高其营养价值。这些物质在口腔中释放后, 可以刺激嗅觉感受器, 使人感受到更加浓郁的香气, 使消费者更愿意品尝和享用这种苹果干。此外, 这些物质还具有抗氧化、抗炎等生物活性, 可以提升苹果干的营养价值, 使其更具健康效益。

2.3.3 挥发性物质的主成分分析 结合 PCA 图 (图 3) 可以发现 6 种样品中鲜样(P1)与所有干燥样品距离最远, 表明鲜样与干燥样品的挥发性物质差异最大, 其次微波-压差膨化干燥(P5)与其它 4 种干燥方式的距离也较大, 说明微波-压差膨化干燥方式对苹果干的风味差异影响较大, 剩余其它样品间的差异较小。其中, 热风干燥(P2)、太阳能干燥(P3)、真空冷冻干燥(P4)和热泵干燥(P6)样品相隔相近, 但是也能彼此分开, 表明这些干燥方式的苹果干挥发性物质有差异, 可能是干燥原理不同导致挥发性物质存在差异, 其中 P2 和 P3 的挥发性物质非常相似,

说明热风干燥和太阳能干燥的效果接近。因此, 采用气相离子迁移谱技术可以鉴定不同干燥方式对苹果干中醛类、酮类和醇类等挥发性风味物质的影响, 从而分析出哪种干燥方式更有利于保留苹果干的营养价值和口感、香气等特性。

2.4 感官评价

从表 8 可以看出, 真空冷冻干燥是感官评价最好的干燥方式, 产品的色泽亮白, 饱满完整, 口感爽脆, 苹果果香浓郁。特别在色差和香味方面, 真空冷冻干燥制备的苹果干更接近新鲜静宁苹果。然而, 其它 4 种干燥方式的产品颜色较暗黄, 咀嚼较硬、外观不完整、果味寡淡。结果表明, 真空冷冻干燥是一种较为理想的苹果干制备方法, 能够较好地保留苹果原有的色泽和口感, 同时提高产品的营养价值。而其它干燥方法可能因为温度较高或干燥时间较长等因素导致苹果原有色泽和口感的欠佳。

表 8 不同干燥方式对苹果干感官评价的影响

Table 8 Effects of different drying methods on sensory evaluation of dried apples

干燥方式	色差	香味	口感	组织形态	总分
热风干燥	15.20±0.37 ^a	23.40±0.64 ^c	21.70±0.27 ^c	12.30±0.37 ^d	72.60±1.65 ^c
太阳能干燥	16.50±0.62 ^b	25.70±0.39 ^b	22.30±0.64 ^c	12.90±0.53 ^c	77.40±2.18 ^b
真空冷冻干燥	18.30±0.47 ^a	28.30±0.72 ^a	26.80±0.47 ^a	14.30±0.36 ^a	87.70±2.02 ^a
微波-压差膨化干燥	16.80±0.35 ^b	26.50±0.36 ^b	25.50±0.35 ^b	12.30±0.42 ^d	81.10±1.48 ^b
热泵干燥	15.30±0.23 ^c	24.30±0.40 ^c	24.30±0.42 ^b	13.50±0.32 ^b	77.40±1.38 ^b

3 结论

本研究探讨了 5 种干燥方式对静宁苹果干的能耗、抗氧化活性、微观结构和风味的影响。结果表明, 真空冷冻干燥是一种有效的加工方法, 虽然单位能耗较高, 但是可以显著提高苹果干零食品质。这种方法处理的苹果干具有较适的硬脆度, 较高的 L^* 值和与新鲜样品最接近的 ΔE 值。真空冷冻干燥苹果干的细胞层呈现出规律性的海绵状多孔结构, 能够很好地保留苹果原有的组织形态, 同时可以有效减缓了苹果干抗氧化活性的损失。采用气相离子迁移谱对

真空冷冻干燥苹果干鉴定出醛类、酮类和醇类等挥发性风味物质的含量明显增加, 使苹果干更加芳香、口感更加丰富。因此, 真空冷冻干燥是提高苹果干零食品质的有效加工方式。然而, 为了达到节能减排和降低生产成本的目标, 仍需探索适合苹果干品质特性的联合真空冷冻干燥技术, 通过人工智能技术和机器学习算法研究干燥过程的动态模型, 优化联合干燥工艺, 为苹果干的感知加工技术升级和产品规格等级转化提供支持, 为苹果干精深加工技术的可持续发展提供研究依据。

© 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] 张红妮, 王小云, 李涛, 等. HACCP体系在静宁苹果NFC益生菌发酵苹果汁中的应用研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(5): 93-97, 108. [ZHANG H N, WANG X Y, LI T, et al. Application of HACCP system in NFC probiotic fermented apple juice from Jingning apple[J]. Food and Fermentation Science and Technology, 2023, 59(5): 93-97, 108.]
- [2] 甘肃省农业科学院办公室. 甘肃省农业科学院年鉴(2021)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 162-165. [Office of Gansu Academy of Agricultural Sciences. Yearbook of Gansu Academy of Agricultural Sciences(2021)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2023: 162-165.]
- [3] DU Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Innovative applications of freeze-drying to produce compound formula instant foods: A review[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(13): 2583-2597.
- [4] DU M, LIU Z, ZHANG X, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109854.
- [5] TEPE T K, TEPE B. The comparison of drying and rehydration characteristics of intermittent-microwave and hot-air dried-apple slices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56(11): 3047-3057.
- [6] MOHAMMAD-RAZDARI A, EBRAHIMI R, ZAREIN M, et al. Investigation of ⁶⁰Co gamma irradiation on dehydration kinetics: A case study of apple slices[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(6): 13697.
- [7] 李嘉欣, 吴昕焯, 毕金峰, 等. 气质联用结合电子鼻表征不同温度热风干燥苹果脆片关键香气化合物[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 272-282. [LI J X, WU X Y, BI J F, et al. Characterization of key aroma compounds in hot-air dried apple crisps at different temperatures by gas chromatography coupled with electronic nose[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(18): 272-282.]
- [8] SIEBERT T, BECKER A, BUNZEL M, et al. Evaluation of the usefulness of serial combination processes for drying of apples[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(10): 1274-1290.
- [9] 陈晓玲, 管维良, 侯东园, 等. 不同干燥方式对苹果蟠桃纸的感官品质和理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 51-59. [CHEN X L, GUAN W L, HOU D Y, et al. Effects of different drying methods on the sensory quality and physicochemical properties of apple-peach paper[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(20): 51-59.]
- [10] RAO T S S B, MURUGAN S. Solar drying of medicinal herbs: A review[J]. *Solar Energy*, 2021, 223: 415-436.
- [11] 张芳, 黄玉龙, 汤莹, 等. 苹果片太阳能低温吸附干燥工艺优化与模型研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 160-167, 235. [ZHANG F, HUANG Y L, TANG Y, et al. Optimization and modeling of solar low-temperature adsorption drying process for apple slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 160-167, 235.]
- [12] 马有川. 预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [MA Y C. Study on the effect of pretreatment on the characteristics and quality of vacuum freeze-drying of apple crisps[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [13] WANG H, XUE Y, HU Z, et al. Addition of external water improves the quality attributes of vacuum-frozen and thawed apple slices[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 137: 1-13.
- [14] KRİAA K, NASSAR A F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): Effect of blanching, electric field and freezing[J]. *LWT*, 2022, 165: 113693.
- [15] ŞEN S, AYDIN F. Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power[J]. *Sādhanā*, 2020, 45: 1-10.
- [16] 陈秀惠. 微波膨化处理对苹果脆片品质及营养素的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. [CHEN X H. Research on the effect of microwave expansion treatment on the quality and nutrients of apple crisps[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.]
- [17] SOPRONI V D, BANDICI L, TEUSDEA A C, et al. Phenolic content, antioxidant capacity, and browning impact of apple slices during microwave drying: A chemometric approach[J]. *Processes*, 2023, 11(6): 1601.
- [18] FENG L, XU Y, XIAO Y, et al. Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 128015.
- [19] 洪晨. 气流膨化干燥苹果切片的微观组织结构特性试验研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022. [HONG C. Experimental study on microstructural characteristics of apple slices dried by air-expansion[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2022.]
- [20] 段成全, 张绍红, 李学瑞, 等. 苹果片热泵干燥的实验研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2018, 33(1): 80-86. [DUAN Q C, ZHANG S H, LI X R, et al. Experimental study on heat pump drying of apple slices[J]. Journal of Qingdao University (Engineering and Technology Edition), 2018, 33(1): 80-86.]
- [21] JOKIEL M, BANTLE M, KOPP C, et al. Modelica-based modelling of heat pump-assisted apple drying for varied drying temperatures and bypass ratios[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 19: 100575.
- [22] 文静, 代建武, 张黎骅. 苹果片微波间歇干燥特性及模型拟合[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(04): 81-88. [WEN J, DAI J W, ZHANG L H. Microwave intermittent drying characteristics and model fitting for apple slices[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(04): 81-88.]
- [23] MASZTALERZ K, LYCZKO J, LECH K. Effect of filtrated osmotic solution based on concentrated chokeberry juice and mint extract on the drying kinetics, energy consumption and physicochemical properties of dried apples[J]. *Molecules*, 2021, 26(11): 3274.
- [24] MAO M, YI J, BI J, et al. Modification of cell wall polysaccharides during drying process affects texture properties of apple chips[J]. *Journal of Food Quality*, 2018(3): 1-11.
- [25] 宋娟, 张海燕, 袁晶, 等. 不同干燥方式下菠菜粉理化性质的比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 207-215. [SONG J, ZHANG H Y, YUAN J, et al. Comparison of physicochemical properties of spinach powder under different drying methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 207-215.]
- [26] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.86-2016 食品中抗坏血酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.86-2016 Determination of ascorbic acid in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
- [27] CIURZYŃSKA A, TRUSIŃSKA M, RYBAK K et al. The

influence of pulsed electric field and air temperature on the course of hot-air drying and the bioactive compounds of apple tissue[J]. *Molecules*, 2023, 28(7): 2970.

[28] 邢晓凡, 刘浩楠, 姚飞, 等. 不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 327-333. [XING X F, LIU H N, YAO Fei, et al. Effects of different drying methods on the quality of dried yellow peaches[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(24): 327-333.]

[29] 李翠霞. 红肉苹果新品种多酚组分、生物活性及酿酒特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [LI C X. Research on polyphenol fractions, bioactivity and winemaking characteristics of new red-meat apple varieties[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]

[30] 张翔, 孙晓红, 柏素花, 等. 4 种红肉苹果提取液花青苷含量及体外抗氧化研究[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(3): 179-185, 199. [ZHANG X, SUN X H, BER S H, et al. Anthocyanin content and *in vitro* antioxidant study of four red-fleshed apple extracts[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2018, 35(3): 179-185, 199.]

[31] 张小燕, 张宗营, 彭勇, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥对‘美红’苹果片干燥特性及品质的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1-10[2023-12-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033250>. [ZHANG X Y, ZHANG Z Y, PENG Y, et al. Effects of hot air drying and vacuum freeze drying on drying characteristics and quality of 'Mei Hong' apple slices[J/OL]. *Food and Fermentation Industry*: 1-10[2023-12-01]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033250>.]

[32] 宋娟, 康三江, 张海燕, 等. 干燥处理对黄冠梨生化成分和风味物质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(1): 60-66. [SONG J, KANG S J, ZHANG H Y, et al. Effects of drying treatment on biochemical composition and flavor substances of yellow crown pear [J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2022(1): 60-66.]

[33] JIANG N, LIU C, LI D, et al. Evaluation of freeze drying

combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 216-226.

[34] WANG X, GAO Y, ZHAO Y, et al. Effect of different drying methods on the quality and microstructure of fresh jujube crisp slices[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(2): e15162.

[35] XU B, CHEN J, TILIWA E S, et al. Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 78: 105714.

[36] THAKUR N S, THAKUR A, KUMAR P. Effect of different drying modes on phenolics and antioxidant potential of different parts of wild pomegranate fruits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 274: 109656.

[37] IZLI N, IZLI G, TASKIN O. Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2018, 16(1): 213-221.

[38] KAYACAN S, SAGDIC O, DOYMAZ I, et al. The effect of different drying methods on total bioactive properties, individual phenolic compounds, rehydration ability, color, and microstructural characteristics of Asian pear[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(7): e16682.

[39] DHARA J, KUMAR S S, SAHA M, et al. Study on drying kinetics, antioxidant activity, total bioactive compounds, physicochemical properties and microstructural characteristics of dehydrated star fruits (*Averrhoa carambola*) by different drying methods[J]. *Sustainable Food Technology*, 2023, 1(4): 590-602.

[40] WANG C, ZHANG L, QIAO Y, et al. Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slice[J]. *LWT*, 2022, 160: 113232.