

干燥方法对植物产品化学成分影响的研究进展

邢颖¹, 岳珍珍², 徐怀德³, 王景华⁴, 周素梅⁵

(1.运城学院生命科学系, 山西运城 044000;

2.漯河食品职业技术学院食品工程系, 河南漯河 462000;

3.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;

4.汉中植物研究所, 陕西汉中 723000;

5.中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

摘要:综述了干燥方法对植物产品化学成分影响的研究进展。分析了常规干燥方法如热风干燥、真空干燥、微波干燥、日晒、阴干、冷冻干燥及联合干燥方法如微波-热风、热风-真空、冷冻-微波联合干燥对植物产品中 V_c 、蛋白质、类胡萝卜素等营养成分及酚类物质、挥发性物质、多糖等活性成分的影响, 为植物产品的干燥技术研究提供理论基础。

关键词:干燥方法, 植物产品, 化学成分

Review of Drying Methods on the Chemical Composition of Plant Products

XING Ying¹, YUE Zhen-zhen², XU Huai-de³, WANG Jing-hua⁴, ZHOU Su-mei⁵

(1.Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China;

2.Department of Food Engineering, Luohe Vocational College of Food, Luohe 462000, China;

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

4.Hanzhong Plant Research Institute of Shaanxi Province, Hanzhong 723000, China;

5.Institute of Agro-products Processing Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The progress of effect of different drying methods on the chemical composition of plant products was reviewed. The effects of conventional drying methods such as hot air drying, vacuum drying, microwave drying, sun drying, shade drying, freeze drying and combination drying methods such as microwave-hot air, hot air-vacuum, freeze-microwave combined drying on the nutrients (V_c , proteins, carotenoids) and the active ingredients (phenols, essential oils and polysaccharides) of plant products were studied. The results could provide the theoretical basis for the drying of plant products.

Key words: drying methods; plant products; chemical composition

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2018)21-0342-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.060

引文格式: 邢颖, 岳珍珍, 徐怀德, 等. 干燥方法对植物产品化学成分影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 342-347.

植物产品含水量高, 季节性强, 上市集中, 若处理不及时容易腐烂变质。干燥是植物加工过程中常见的保存方法, 具有降低产品水分活性、抑制酶活及微生物生长的作用, 从而延长植物产品在室温条件下的保藏时间^[1]。干燥过程中无论是否有热参与都会对植物产品产生不同程度的影响, 引起物理、化学或生物性质的改变^[2], 如植物产品的结构特性、视觉特性、复水特性及营养特性^[3]等质量特性发生改变, 同时其营养特性也会受到相应的影响,

而营养特性不仅包括蛋白质、粗纤维、矿物质等基本营养成分, 还包括酚类化合物、多糖、挥发油等功能活性成分。干燥过程中的高温、氧气、微波、紫外线辐射等是影响这些化合物含量、生物利用度等的重要因素^[1,4]。本文全面回顾了干燥方法对植物产品化学成分影响的最新研究成果, 总结了常规干燥方式及联合干燥方式对植物产品中营养组分如 V_c 、类胡萝卜素及活性成分如酚类化合物、挥发油、多糖的影响。

收稿日期: 2018-01-09

作者简介: 邢颖(1988-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: xingyingnice@163.com。

基金项目: 山西省“1331”工程重点学科项目(098-091704)。

1 常规干燥方法对植物产品营养成分及活性成分的影响

常规的自然干燥方法包括晒干和阴干,人工干燥包括烘干、真空干燥、冷冻干燥、微波干燥及中短波红外干燥等。

1.1 常规干燥方法对植物产品营养成分的影响

植物产品中的营养物质主要包括维生素、蛋白质、糖类及矿物质等。王恒超等^[5]研究表明不同干制方式(自然干制、热风干制及真空冷冻干制)对红枣营养物质影响较大。在干制过程中, V_c 和总酸含量随干燥时间的延长及红枣含水量的下降而呈降低趋势, V_c 因其结构中存在烯二醇基,所以极易受热、光、氧和 pH 等因素的影响,在干制过程中损失率极大^[6],经 12 d 自然干制后(22~43 °C, 11 d)红枣表层果肉和深层果肉的 V_c 保存率仅为 3.42% 和 3.52%,热风干制(50~65 °C, 24 h)较自然干制 V_c 保存率高 3.88%。另外,总糖、果糖及葡萄糖的含量呈上升趋势,而蔗糖含量呈下降趋势;可溶性蛋白质的含量呈先下降后上升的趋势,其中采用真空冷冻(12 h)得到干制品对以上几种营养物质的保存率最高,热风干燥次之,自然干制最低。Kumar 等^[7]在对木槿的研究中发现同样的结果,冷冻干燥(-110 °C, 1.2 Pa)得到的木槿中 V_c 含量及抗氧化能力远远高于中短波红外干燥((50±5) °C, 1.1~1.3 μm, 5 h)、气流干燥((50±5) °C, 16 h)、微波干燥(850 W, 5 min)、烘干(65 °C, 5 h)及晒干((35±3) °C, 1 d)。徐晓飞等^[8]研究了不同干燥方式对香菇的营养成分包括水分、灰分、粗脂肪、蛋白质、粗纤维、干物质、高分子多糖和总糖的影响,结果表明冷冻干燥(-40 °C, 1.2 × 10⁴ Pa)对香菇的营养成分影响最小,其次是真空干燥(60 °C, 9.5 × 10⁴ Pa),最差的是热风干燥(60 °C)。真空冷冻干燥过程能较好的保存产品的营养成分,这是因为冻干过程在高度真空的条件下,升华干燥阶段干燥箱中的加热板以辐射的形式将热量传递给干燥物,热量可直接作用于水分子,从而有效减少了营养成分的损失,且低温能有效的抑制植物细胞的呼吸作用^[9]。

在自然状态下,类胡萝卜素的典型结构特点是高度不饱和,其最显著特征为含有 3~15 个共轭双键,共轭双键存在的位置决定类胡萝卜素的功能特性,包括在光合生物中可起到光吸收和光保护的作用、作为细胞膜的抗氧化保护剂^[10]、抗癌及对眼睛的保护等功能^[11]。类胡萝卜素是一种对氧气、辐照等敏感的不稳定物质,在干燥过程中容易被破坏^[12]。邓媛元等^[13]对比了真空冷冻干燥(-80 °C, 0.03~0.04 Pa, 40 h)、日晒干燥(60 °C 处理 1 h 后 20 °C, 8 h)、热泵干燥(60 °C, 6 h)、热风干燥(95 °C, 3h)、微波干燥(800 W 处理 5 min 后 60 °C 风干 30 min)及真空热干燥(60 °C, 1.8~2.0 Pa, 6 h)对苦瓜中类胡萝卜素的影响,热泵干燥苦瓜的类胡萝卜素含量最高为 0.86 mg·g⁻¹ DW,日晒干燥最低为 0.11 mg·g⁻¹ DW,表明日晒干燥对苦瓜中类胡萝卜素的破坏能力最强。采用微波进行干燥时,随着微波功率的增加胡萝卜

素含量呈下降趋势,这是由于高微波功率会被干燥样品吸收,导致其能量急剧上升,不利于类胡萝卜的保留^[14],汪小婷在对南瓜片的干燥研究中发现类似的结果^[15]。

1.2 常规干燥方法对植物产品活性成分的影响

1.2.1 常规干燥方法对植物产品中酚类化合物的影响 酚类化合物是植物生长所必需的次生代谢物,在恶劣环境中可保护植物免于不利因素如干旱、紫外线辐射、感染及物理损害等的影响^[16]。研究表明酚类化合物具有清除自由基、螯合金属离子和防止脂质过氧化的作用,此外饮食中的多酚类化合物具有抗肿瘤、降低血糖、预防心脏病等作用^[17]。

植物在干燥过程中微观结构会发生变化,其酚类化合物的含量也会随之改变,不同植物中酚类化合物含量的变化趋势各不相同。ÖA Gümüüşay 等^[17]采用晒干(25~30 °C, 36 h 日晒)、烘干(60 °C, 36 h)、真空干燥(60 °C, 2.5 Pa, 36 h)及冷冻干燥(-50 °C, 13.3 Pa, 24 h)对生姜和西红柿进行处理发现,与新鲜样品相比,经过干燥之后多酚含量均有所下降。在低温条件下进行干燥,一些氧化酶如多酚氧化酶和过氧化酶等的活化会导致多酚含量的下降。另外,酚类化合物与蛋白质的结合、化学结构的改变及不合适的提取方法都可能是酚类化合物含量降低的原因。而 S Roshanak 等^[18]对绿茶采用阴干(25 °C, 36 h)、晒干(30~35 °C, 7.5 h)、60 °C 烘干、80 °C 烘干、100 °C 烘干、微波(800 W, 240 s)及冷冻干燥(-50 °C, 24 h)进行处理,研究结果却表明,干燥过程可能会破坏植物组织的细胞,导致更多酚类物质的释放,从而干燥的样品中多酚含量较新鲜样品均有所升高。这可能与多酚在植物材料中的类型和在细胞中的位置相关^[12]。López 等^[19]采用 50、60、70、80、90 °C 的热风对蓝莓进行干燥,其中干制品中多酚含量显著地低于新鲜样品,且多酚含量随着温度的升高而增加。这可能是由于在低温条件下所需的干燥时间较长,使得空气中的氧化物质与样品中的抗氧化物质发生反应,从而使得总酚含量下降。

G Zhao 等^[20]比较了热风干燥(70 °C, 12 h)、微波干燥(136 W, 4 h)及微波-热风联合干燥(136 W, 2.5 h, 70 °C, 1 h)对桃金娘浆果的影响,其中采用微波干燥和热风干燥所得到的酚类含量较低,这可能是由于需要更长干燥的时间和更高的干燥温度导致了酚类物质的损失。其中,微波干燥得到的总酚含量显著高于热风干燥,Izli 等^[21]在对黄瓜的研究中发现类似的结果。这可能是由两方面的原因造成的:一是微波干燥时间短会减少氧化反应的发生,同时,较高的温度会降低酶活性^[22-23]。另一方面,微波干燥可加速大分子物质(如膳食纤维或蛋白质)与植物组织的破裂,从而释放出更多的与大分子共价键结合的多酚类物质^[24-26]。

真空冷冻干燥是非加热的干燥方式,会使干燥材料具有低密度,高孔隙率的特性。N Izli 等^[27]研究了不同干燥方式对猕猴桃中多酚含量及抗氧化活性的影响,新鲜猕猴桃中多酚的含量为 381.8 mg GA/

100 g, 经过热风干燥(60、70、80℃)、微波干燥(120、350 W)及冷冻干燥(-50℃, 52 Pa)之后猕猴桃中的多酚含量与新鲜样品相比下降5%~49%, 其中冷冻干燥样品中多酚含量最高, 为361.38 mg GA/100 g。L Valadez - Carmona 等^[28]采用微波(595 W, 11.5 min)、热风(60℃, 24 h)及冷冻干燥(-60℃, 20~40 Pa, 24 h)对可可豆荚进行干燥, 其中采用冷冻干燥得到的多酚含量最高, 是新鲜样品中多酚含量的5.86倍。这可能是由于植物材料经过预冷冻之后水形成冰晶体, 而冰晶体会破坏植物细胞结构, 同时在干燥过程中水分升华导致干燥材料中形成蜂窝网络状结构, 冷冻干燥的高提取率可能与细胞结构的破坏及多孔网络结构有利于溶剂的溶入及细胞组分的溶出^[29]有关。

1.2.2 干燥方法对植物产品多糖的影响 多糖是一种广泛存在于植物中的碳水化合物, 研究表明多糖具有独特的活性, 例如抗炎、抗凝血、抗病毒、抗癌及抗氧化等作用^[30-33]。多糖的表面形态和结构受到不同干燥、提取、纯化及制备方法的影响^[34-36]。

L Kong 等^[37]分析了真空干燥法(72 h)及真空冷冻干燥法(-60℃, 24 h)对白芍多糖理化特性的影响, 真空冷冻干燥得到的多糖具有空隙大小均一的网状松散结构, 在溶解后能与水很好的结合, 而真空干燥得到的多糖具有絮状纤维的紧密结构, 其溶解度小于真空冷冻干燥得到的多糖。

吴振等^[38]研究了热风干燥(50℃, 16 h)、冷冻干燥(-50℃, 72 h)及真空干燥(50℃, 6×10^4 Pa, 12 h)三种干燥方式对银耳多糖理化特性和抗氧化活性的影响, 结果表明由于高温条件下多糖分子易发生交联和聚集, 因此通过热风干燥得到的银耳多糖相对分子质量最大, 而冷冻干燥得到的多糖相对分子质量最小, 这可能是由于冻干过程中随着温度的升高, 细胞中部分酶被激活, 促进了大分子糖类物质的代谢, 多糖发生降解^[39], 降解之后的低分子质量多糖能显现出较强的抗氧化作用, 其抗氧化活性也是最强。L Ma 等^[40]在对不同干燥对枸杞的研究中发现类似结果, 采用冷冻干燥(-50℃)得到的多糖产量最高, 抗氧化活性最强, 均优于热风干燥(50℃)和真空干燥(50℃)。

结果表明, 采用真空冷冻干燥对植物产品进行处理得到的多糖含量高, 且是具有网络松散结构的低分子质量多糖, 其溶解度高, 抗氧化活性强; 而高温条件下处理植物产品, 多糖分子易发生聚集, 导致得到的多糖分子质量大, 抗氧化性低。

1.2.3 干燥方法对植物产品挥发油及挥发性组分的影响 植物挥发油又称精油、香精油、芳香油, 是从植物的花、茎、叶、皮、根、果实中提取出的一类植物次生代谢产物, 分子量比较小可随水蒸气蒸馏, 具有一定芳香气味且能在常温下挥发^[41]。植物精油具有多种生物活性, 例如抗菌、抗氧化、杀虫等, 在食品、香料及制药等行业具有广泛的应用^[42]。

Rahimmalek 等^[43]采用阴干(25℃, 3 d)、微波(300 W, 0.25 min)、晒干(30~40℃, 13 h)、50℃烘干(20 h)、70℃烘干(15 h)及冷冻干燥(-15℃,

6 h)对百里香叶进行处理, 结果表明不同干燥方式对百里香叶挥发油含量影响显著。经过干燥之后, 挥发油含量的升高或者降低主要取决于干燥温度及干燥时间。冷冻干燥温度低且时间短, 因此得到的挥发油含量最高为1.7%, 而阴干时间长, 百里香叶长时间暴露在空气中, 导致挥发油含量下降为0.91%。

Argyropoulos 等^[44]对比了不同干燥温度(30、45、60、75、90℃)对木犀草中精油含量的影响, 结果表明在所有的干燥温度下木犀草精油含量均有所下降, 且随着干燥温度的升高精油含量下降幅度越大, 其中30、45、60、75℃条件下精油含量分别下降了16%、23%、65%及73%。通过扫描电子显微镜的观察推测精油的损失可能与热风干燥过程中植物材料角质层的收缩及细胞的损伤有关。有关精油含量与干燥温度呈负相关也有类似报道, 如罗勒^[45]、百里香^[46]等植物中。采用微波干燥得到的植物挥发油含量均比较低, 如月桂树叶^[47]、紫色罗勒和绿色罗勒^[48]等中。原因可能归结于在微波干燥过程中植物材料组织结构及角质层会收缩, 栅栏层的叶肉细胞和表皮细胞严重倒塌^[49]。

植物材料中的挥发性组分是干燥过程中变化最为显著的成分, 其中, 干燥参数(方法、温度和时间)及植物材料的生物学特性是影响挥发性组分变化的重要因素^[50]。不同干燥方式对植物挥发油含量的影响不一样, 这与干燥机理、挥发油的分泌组织及组分、植物生长环境有关, 不同的植物材料应根据自身的特性选择合适的干燥方式^[43]。

2 联合干燥方法对植物产品化学成分的影响

自然晒干及阴干操作简单, 节约成本, 但干燥时间长且易受气候的影响; 真空冷冻干燥可最大限度的保持产品活性、风味及形状等原有特性, 但是需消耗大量的时间和能量, 干燥成本高, 且由于真空不利于挥发性化合物的形成^[51]; 采用热风干燥得到的产品不仅易皱缩及褐变, 且营养成分损失严重; 真空干燥对于在高温或有氧气的环境中易发生损坏或变化的植物材料而言是比较好的选择, 真空干燥不仅能够除去植物材料中的水分还能防止其中的活性物质与氧气接触发生氧化, 但是植物材料在真空干燥箱中易产生气泡, 导致干燥物料的不均匀^[52]; 微波干燥技术干燥时间短、效率高, 但是微波干燥单独使用时, 由于干燥材料的大小形状不一, 受热不均匀而导致过热和碳化, 干燥材料水分含量较低时, 微波转化为热量的程度降低, 干燥样品对微波穿透力产生限制, 从而导致干燥材料结构的损坏程度增强^[53]。联合干燥技术是结合各种干燥方法的特点, 进行分阶段干燥的一种复合技术, 实现单一干燥所不能达到的目的, 具有最大程度保留物料原有的品质和色泽的优势。联合干燥能够较好地控制整个干燥过程, 提高干燥效率、节约能源成本、改善产品质量, 尤其适用于植物产品中一些对热敏感、易氧化的物料^[54-55]。

2.1 联合干燥方法对植物产品营养成分的影响

热风-真空联合干燥是根据植物产品在不同干

干燥阶段含水量及组织结构等特性的不同而进行的干燥,联合干燥能够结合热风 and 真空干燥的优点,既能平衡植物产品内部的水分,又能改善产品的色泽,且不影响产品的品质。陈君琛等^[54]对即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺进行了优化,确定的最佳工艺条件为:先热风干燥(60℃,20 min,转换点湿基含水率 $\leq 78\%$),后真空干燥(55℃,-900 MPa);联合干燥即食杏鲍菇休闲产品的品质优于热风干燥和真空干燥产品的品质,能耗比真空干燥减少57%。

2.2 联合干燥方法对植物产品活性成分的影响

微波-热风联合干燥是最常见联合干燥技术之一,在这种组合干燥技术中,热空气可以从样品的表面除去自由状态的水,微波可以从产品的内部除去水分^[56]。这样不仅可以提高干燥速率,还可保持干燥产品良好的质量特性^[57]。E Horuz 等^[58]采用微波联合烘干对酸樱桃进行处理,研究表明联合干燥处理时间短,得到的样品中多酚含量高,抗氧化活性强。刘小丹^[59]等采用微波+高温热风+低温热风组合方式对红枣进行干燥,与热风干燥相比,组合干燥速率高(组合方式干燥时间为22.4 h,热风干燥时间为28 h),能耗低(组合方式能耗为 $26.32 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$),热风干燥能耗为 $30.8 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$),且抑制了干燥过程中酶促褐变并减缓了非酶褐变。

微波真空干燥(MWVD)是一种干燥温度低、速率高且能获得高质量产品的干燥方式,在微波真空干燥之前或之后使用冷冻干燥能较好降低能耗,提高产品品质^[60]。Lue-lue Huang 等^[61]对比了冷冻(-40℃,100 Pa)、冷冻-微波真空联合(先于-40℃,100 Pa下干燥,后于绝对压力为5000 Pa,转速为5 r/min下干燥)及微波真空-冷冻干燥(先于绝对压力为5000 Pa,转速为5 r/min下微波真空干燥20 min,后于-40℃,100 Pa下干燥)联合三种方式对苹果片的影响,其中冷冻-微波真空联合干燥得到的产品中糖和总酚含量高,香味成分保留性好,且产品脆性好、色泽优。NingJiang 等^[62]以秋葵为原料,对比了热风干燥(70℃,风速1.5 m/s)、冷冻干燥(-50℃,20 Pa,41 h)、微波真空干燥(7×10^4 Pa,1536 W,微波脉冲比为1.5)、热风-微波真空联合干燥(先于70℃,风速1.5 m/s条件下处理2 h,后于 7×10^4 Pa,1536 W,微波脉冲比为1.5条件下处理)及冷冻-微波真空联合干燥(先于-50℃,20 Pa条件下冷冻干燥至水分含量小于80 g/100 g,后于 7×10^4 Pa,1536 W,微波脉冲比为1.5条件下处理)对其主要活性成分及抗氧化性的影响,研究结果表明冷冻-微波真空联合干燥产品的色值和品质较好,具有更高的抗氧化特性保持性,且干燥速率高,能耗低。

王迪等^[63]采用远红外(70℃,10.2 h)、热风(70℃,8.2 h)、真空冷冻(-45℃,400 Pa,41 h)、真空微波(微波间歇比为1.5,能量密度为8 W/g,0.25 h)、真空冷冻联合真空微波(先-45℃,400 Pa干燥约10 h至平均含水量为80%,再于微波间歇比为1.5,能量密度为8 W/g下处理0.25 h)及热风联合真空微波(70℃下干燥2 h至含水量60%,再于微波

间歇比为1.5,能量密度为8 W/g下处理0.15 h)对黄秋葵进行处理,其中采用真空冷冻干燥得到的多糖含量最高,为69.28 mg/g d·w,真空微波干燥由于升温快、干燥时间短,样品中多糖的含量仅次于真空冷冻及真空冷冻联合真空微波干燥,而热风干燥及远红外干燥所需温度高,干燥时间长,因此其含量最低。

3 结论与展望

本文着重分析了常见的干燥方式如热风干燥、真空干燥、微波干燥、日晒、阴干、冷冻干燥及联合干燥方法如微波-热风、热风-真空、冷冻-微波联合干燥对植物产品营养成分及活性成分的影响,为植物材料干燥方法的选择提供一定的理论基础。干燥是植物产品加工过程中常见的工序,近年来关于不同干燥方式对植物产品物理特性及化学成分的影响研究越来越多,但是有关不同干燥方式对植物产品影响的机理研究尚不完善,很多理化特性变化的解释仅为推测,大多数没有相关理论的支持。另外,有关联合干燥的研究仍处于工艺优化及横向对比方面,缺乏相应的联合干燥设备,只能停留在实验室研究阶段,无法实现工业化生产。因此,应着重加大干燥机理的研究,合理的解释理化特性的改变,同时为联合干燥机械设备的研制提供理论支持。

参考文献

- [1] M Valdenegro, S Almonacid, C Henríquez, et al. The effects of drying processes on organoleptic characteristics and the health quality of food ingredients obtained from goldenberry fruits (*Physalis peruviana*) [J]. Open Access Scientific Reports, 2013, 2:642.
- [2] C Niamnuy, S Devahastin, S Soponronnarit. Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123(123):148-156.
- [3] 宋洪波, 毛志怀. 干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(6):117-121.
- [4] V T Nguyen, V V Quan, M C Bowyer, et al. Effects of different drying methods on bioactive compound yield and antioxidant capacity of *Phyllanthus amarus* [J]. Drying Technology, 2015, 33(8):1006-1017.
- [5] 王恒超, 陈锦屏, 符恒, 等. 骏枣干制过程中几种营养物质的变化规律 [J]. 食品科学, 2012(15):48-51.
- [6] Goula A M, Adamopoulos K G. Retention of ascorbic acid during drying of tomato halves and tomato pulp [J]. Drying Technology, 2006, 24(24):57-64.
- [7] S S Kumar, P Manoj, N P Shetty. Effect of different drying methods on chlorophyll, ascorbic acid and antioxidant compounds retention of leaves of *Hibiscus sabdariffa* L [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95:1812-1820.
- [8] 徐晓飞, 向莹, 张小爽, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(17):259-262.
- [9] 魏婷, 高彩凤, 沈静, 等. 真空冷冻干燥过程中鲜食枣营养品质的变化研究 [J]. 现代食品科技, 2017(5):161-167.

- [10] C A Tracewell, J S Vrettos, J A Bautista, et al. Carotenoid photo-oxidation in photosystem II Arch [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2001, 385(1): 61-69.
- [11] 朱明明, 樊明涛, 何鸿举. 类胡萝卜素降解方式的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 308-317.
- [12] E Capecka, A Mareczek, M Leja. Antioxidant activity of fresh and dry herbs of some *Lamiaceae* species [J]. Food Chemistry, 2005, 93(2): 223-226.
- [13] 邓媛元, 汤琴, 张瑞芬, 等. 不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 362-371.
- [14] XF Shi, JZ Chu, YF Zhang, et al. Nutritional and active ingredients of medicinal chrysanthemum flower heads affected by different drying methods [J]. Industrial Crops & Products, 2017, 104: 45-51.
- [15] 汪小婷, 宋江峰, 李大婧, 等. 真空微波干燥对南瓜片主要类胡萝卜素的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 91-96.
- [16] M Elmastaş, A Demir, N Genç, et al. Changes in flavonoid and phenolic acid contents in some *Rosa* species during ripening [J]. Food Chemistry, 2017, 235: 154-159.
- [17] ÖA Gümüşay, AA Borazan, N Ercal, et al. Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger [J]. Food Chemistry, 2015, 173(3): 156-162.
- [18] S Roshanak, M Rahimmalek, SA Goli. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves [J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(1): 721-729.
- [19] J López, E Uribe, A Vega-Gálvez, M Miranda, et al. Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O'Neil [J]. Food & Bioprocess Technology, 2010, 3(5): 772-777.
- [20] G H Zhao, R F Zhang, L Liu, et al. Different thermal drying methods affect the phenolic profiles, their bioaccessibility and antioxidant activity in *Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hasskberries [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 260-266.
- [21] J López, E Uribe, A Vega-Gálvez, et al. Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry (*Physalis peruviana* L.) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49: 9-17.
- [22] D Arslan, M M Özcan. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices [J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(7): 1121-1127.
- [23] J Yang, J F Chen, Y Y Zhao, et al. Effects of drying processes on the antioxidant properties in sweet potatoes [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2010, 9(10): 1522-1529.
- [24] J Boateng, M Verghese, L T Walker, et al. Effect of processing on antioxidant contents in selected dry beans (*Phaseolus* spp. L.) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(9): 1541-1547.
- [25] K Hayat, X M Zhang, U Farooq, et al. Effect of microwave treatment on phenolic content and antioxidant activity of citrus mandarin pomace [J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 423-429.
- [26] M Omwamba, Q Hu. Antioxidant activity in barley (*Hordeum vulgare* L.) grains roasted in a microwave oven under conditions optimized using response surface methodology [J]. Journal of Food Science, 2010, 5(1): 66.
- [27] N Izli, G Izli, O Taskin. Drying kinetics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity properties of kiwi dried by different methods [J]. Journal of Food Measurement & Characterization, 2016: 1-11.
- [28] L Valadez-Carmona, CP Plazola-Jacinto, M Hernández-Ortega, et al. Effects of microwaves, hot air and freeze-drying on the phenolic compounds, antioxidant capacity, enzyme activity and microstructure of cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 378-386.
- [29] M H Ahmad-Qasem, V Micol, A Mulet. Influence of freezing and dehydration of olive leaves (var. Serrana) on extract composition and antioxidant potential [J]. Food Research International, 2013, 50(1): 189-196.
- [30] W Wei, L Feng, W R Bao, et al. Structure characterization and immunomodulating effects of polysaccharides isolated from *Dendrobium officinale* [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2016, 64(4): 881-889.
- [31] Z S Wen, X W Xiang, H X Jin, et al. Composition and anti-inflammatory effect of polysaccharides from *Sargassum horneri* in RAW264.7 macrophages [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 403-413.
- [32] W Cai, H Xu, L Xie, et al. Purification, characterization and *in vitro* anticoagulant activity of polysaccharides from *Gentiana scabra* Bunge roots [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 140(1): 308-313.
- [33] Y Cao, Y Hao, Z Li, et al. Antiviral activity of polysaccharide extract from *Laminaria japonica* against respiratory syncytial virus [J]. Biomed Pharmacoth, 2016, 84(86): 1705-1710.
- [34] J Hu, X Jia, X Fang, et al. Ultrasonic extraction, antioxidant and anticancer activities of novel polysaccharides from Chuanxiong rhizome [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 85: 277-284.
- [35] J G Lee, W T Hsieh, S U Chen, et al. Chiang Hematopoietic and myeloprotective activities of an acidic Angelica sinensis polysaccharide on human CD34 + stem cells [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2012, 139(3): 739-745.
- [36] J F Yuan, Z Q Zhang, Z C Fan, et al. Antioxidant effects and cytotoxicity of three purified polysaccharides from *Ligusticum chuanxiong* Hort [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 74(4): 822-827.
- [37] L S Kong, L Yu, T Feng, et al. Physicochemical characterization of the polysaccharide from *Bletilla striata*: Effect of drying method [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 125: 1-8.
- [38] 吴振, 李红, 罗杨, 等. 不同干燥方式对银耳多糖理化特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 93-97.
- [39] Pei F, Shi Y, Gao X Y, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during

different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying [J]. Food Chemistry, 2014, 165: 547-554.

[40] L Ma, H Chen, W Zhu, et al. Effect of different drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides extracted from mushroom *Inonotus obliquus* [J]. Food Research International, 2013, 50(2): 633-640.

[41] 张艳东, 程翠林, 樊梓鸾, 等. 植物精油的提取、成分分析及抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 390-394.

[42] 孟玉霞, 崔惠敬, 赵前程, 等. 植物精油在水产品保鲜中的研究进展 [J]. 食品科学, 2017, 38(15): 288-293.

[43] M Rahimmalek, G Sah. Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymus daenensis* subsp. *daenensis*. Celak leaves [J]. Industrial Crops & Products, 2013, 42(1): 613-619.

[44] D Argyropoulos, J Müller. Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) [J]. Industrial Crops & Products, 2014, 52(1): 118-124.

[45] Á Calínsánchez, K Lech, A Szumny, et al. Volatile composition of sweet basil essential oil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by drying method [J]. Food Research International, 2012, 48(1): 217-225.

[46] S Sárossi, L Sipos, Z Kókai, et al. Effect of different drying techniques on the aroma profile of thymus vulgaris analyzed by GC-MS and sensory profile methods [J]. Industrial Crops & Products, 2013, 46(3): 210-216.

[47] IH Sellami, WA Wannes, I Bettaieb, et al. Qualitative and quantitative changes in the essential oil of *Laurus nobilis* L. leaves as affected by different drying methods [J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 691-697.

[48] P A Ghasemi, E Mahdad, L Craker. Effects of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil of two basil landraces [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2440-2449.

[49] A N Yousif, C H Scaman, T D Durance, et al. Flavor volatiles and physical properties of vacuum-microwave- and air-dried sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1999, 47(11): 4777-4781.

[50] A Calín-Sánchez, A Figiel, K Lech, et al. Drying methods affect the aroma of *Origanum majorana* L. analyzed by GC-MS and descriptive sensory analysis [J]. Industrial Crops & Products, 2015, 74(71): 218-227.

[51] J Huang, M Zhang. Effect of three drying methods on the

drying characteristics and quality of okra [J]. Drying Technology, 2016, 34(8): 900-911.

[52] Q S Zhao, B T Dong, J J Chen, et al. Effect of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of wolfberry (*Lycium barbarum*) polysaccharide [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 127: 176.

[53] M Zhang, J Tang, A S Mujumdar, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17: 524-534.

[54] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劼, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 331-338.

[55] 苏丹, 李树君, 赵凤敏, 等. 农产品联合干燥技术的研究进展 [J]. 农机化研究, 2014(11): 236-240.

[56] P W Y Sham, C H Scaman, T D Durance. Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety [J]. Journal of Food Science, 2001, 66(9): 1341-1347.

[57] P S Sunjka, T J Rennie, C Beaudry, et al. Microwave convective and microwave-vacuum drying of cranberries: A comparative study [J]. Drying Technology, 2004, 22(5): 1217-1231.

[58] E Horuz, H Bozkurt, H Karataş, et al. Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 295-305.

[59] 刘小丹, 张淑娟, 贺虎兰, 等. 红枣微波-热风联合干燥特性及其品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 280-286.

[60] L L Huang, M Zhang, W Q Yan, et al. Effect of coating on post-drying of freeze-dried strawberry pieces [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92: 107-111.

[61] L L Huang, M Zhang, L P Wang, et al. Influence of combination drying methods on composition, texture, aroma and microstructure of apple slices [J]. LWT - Food Science and Technology, 2012, 47(1): 183-188.

[62] N Jiang, Z Zhang, D Li, 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.

[63] 王迪, 李大婧, 江宁, 等. 不同干燥方式对黄秋葵脆条品质及能耗的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 101-105.

全国中文核心期刊
轻工行业优秀期刊