

果蔬微波联合干燥技术研究进展

张鹏¹, 颜碧², 李江阔¹, 李春媛¹

(1.国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津) 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384; 2.沈阳农业大学 食品学院, 沈阳 110866)

摘要: 目的 通过对微波和微波联合干燥技术干燥效果的探讨, 以期为我国果蔬采后加工贮藏的研究提供理论参考。方法 介绍果蔬微波干燥以及果蔬微波联合干燥的原理、特性、研究进展和存在的问题, 并对我国果蔬干燥加工的研究进行展望。结果 微波干燥技术在果蔬加工方面具有很好的应用前景, 它不仅可以达到干燥的目的, 提高果蔬的经济效益, 还能缩短果蔬的干燥时间, 减少能量的消耗, 维持产品较好的色香味和营养物质含量。结论 微波干燥技术在采后的果蔬加工方面发挥着极其重要的作用, 是果蔬采后加工过程中重要的技术, 具有广阔的应用前景。

关键词: 果蔬; 微波干燥; 微波联合干燥; 研究进展

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)19-0016-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.003

Research Progress on Microwave Combined Drying Technology of Fruits and Vegetables

ZHANG Peng¹, YAN Bi², LI Jiang-kuo¹, LI Chun-yuan¹

(1.Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, National Engineering and Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Tianjin 300384, China;
2.School of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

ABSTRACT: The work aims to study the drying effects of microwave and microwave combined drying technology, in order to provide theoretical reference for the research on postharvest processing and storage of fruits and vegetables in China. The principles, characteristics, research progress and existing problems of microwave drying and microwave combined drying of fruits and vegetables were introduced, and the research on the drying process of fruits and vegetables in China was prospected. Microwave drying technology had a good application prospect in the processing of fruits and vegetables. It could not only achieve the purpose of drying, improved the economic benefits of fruits and vegetables, but also shorten the drying time of fruits and vegetables, reduced energy consumption, and maintained good color and aroma and nutrient content of products. Microwave drying technology plays an extremely important role in the processing of postharvest fruits and vegetables. It is an important technology during postharvest processing of fruits and vegetables and has broad application prospects.

KEY WORDS: fruits and vegetables; microwave drying; microwave combined drying; research progress

收稿日期: 2019-08-13

基金项目: 天津市科技计划(18YFYZCG00010)

作者简介: 张鹏(1981—), 女, 博士后, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)副研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

通信作者: 李江阔(1974—), 男, 博士后, 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津)副研究员, 主要研究方向为农产品安全与果蔬贮运保鲜新技术。

果蔬含有丰富的营养物质, 深受大家的喜爱。由于果蔬水分含量较高, 生命活动和呼吸代谢强, 因此不宜贮藏时间过长, 极易发生腐败变质问题。最常见的果蔬保存方式之一就是干燥。果蔬中的水分以自由水和结合水存在, 干燥可除去自由水, 但是结合水难以去除^[1]。随着国家的进步, 人民生活水平逐渐提高, 不再局限于温饱问题, 而是更加看重健康和营养。传统的干燥技术不仅会造成果蔬的营养成分大量流失, 而且还会产生对人体健康危害的物质, 严重影响果蔬干制品的经济效益, 因此, 果蔬加工过程急需一种有效的干燥技术。

果蔬微波干燥的原理是果蔬中水分吸收微波能后转变为热能, 使果蔬温度升高, 水分蒸发散失, 从而达到干燥的效果^[2]。相对于单一的干燥技术, 微波联合干燥技术在干燥时间、品质、能量消耗等方面具有较好的优势, 是一个很好的发展方向^[2]。微波干燥技术在果蔬干燥加工方面发挥着极其重要的作用。文中通过对微波干燥以及微波干燥联合其他干燥技术的干燥效果进行探讨, 为我国果蔬采后干燥贮藏的研究提供参考, 并对我国果蔬采后干燥技术的进一步研究进行展望。

1 果蔬微波干燥技术

1.1 原理和特点

果蔬微波干燥的微波频率为 300 MHz~3000 GHz, 波长为 0.1 mm~1 m, 果蔬在微波的辐射条件下, 内部的分子运动产生热量, 使得果蔬的温度上升, 游离水和结合水散失, 从而达到干燥的目的^[3-7]。微波干燥机干燥的原理见图 1。微波干燥技术在保持果蔬的营养物质、复水性、产品的外观形状以及产品的色香味等方面均具有较好的优势, 而且果蔬微波干燥过程不仅干燥速度快、时间短, 且无污染物和热量的残留^[8-9]。微波干燥技术缩短了干燥的周期, 主要是由于微波干燥时, 微波具有极强的穿透性, 使得果蔬

内部温度远高于表面温度, 内部的水分化学势也显著高于表面, 在化学势差的作用下, 水分由内到外的传递速度加快, 且其热传导方向与水分扩散方向相同, 这为水分的蒸发制造了有利条件, 促进了果蔬中水分的蒸发, 提高了干燥速率。微波能的利用率较高, 主要是由于在密闭的系统中, 微波能主要用于加热, 其他方面的消耗极少, 大大地节约了能量, 并且装置的内壁对微波能具有反射作用, 再次减少了微波能的损失^[10-11]。微波干燥技术的不足之处在于干燥不均匀, 产品颜色和形状变化较大, 水分的含量难以控制等方面。果蔬内外温度相差过大或者温度过高会造成果蔬干制品品质的下降, 若表面的热量和水分散发不及时, 会对果蔬的品质造成破坏^[12]。

1.2 研究现状

近几年来, 微波干燥技术在果蔬干燥加工方面研究较为普遍。魏来^[13]、贾淞^[14]、刘梦迪^[15]、孔庆新^[16]、Concetta^[17]、马林等^[18]分别研究了采用微波干燥技术对白胡椒、油菜花、绿萼梅、南瓜粉、西西里红色大蒜和枸杞进行干燥的效果, 发现微波干燥速度较快, 可缩短干燥时间, 干燥产品具有较好的质量、色泽和感官性状, 而且会产生一些对人体有益的活性物质, 深受消费者的喜爱。干燥功率和时间是影响营养物质含量减少的主要因素, 应选择合适的微波功率和处理时间。王美霞等^[19]在研究微波干燥苹果切片过程中发现, 干燥产品的相对含水量不能过低或者过高, 过低会造成焦糊, 过高则不能达到干燥的目的。和珊等^[20]研究表明, 微波功率与菜籽干燥的速度呈正相关, 但微波功率过高会对营养物质造成不必要的损失。张怡^[21]、张芳等^[22]对莲子和当归进行了微波干燥研究, 发现微波的功率与钝化莲子 PPO 活性呈正比, 但功率过高或时间过长会造成焦化现象; 当微波干燥功率为 12 kW, 水分的质量分数为 15% 时, 当归的外观和品质最佳。微波干燥的功率和时间对果蔬的干燥影响较大, 均不宜过大, 否则会造成焦化现象。最佳的微波干燥功率和时间不仅可以缩短干燥时间、保持果蔬

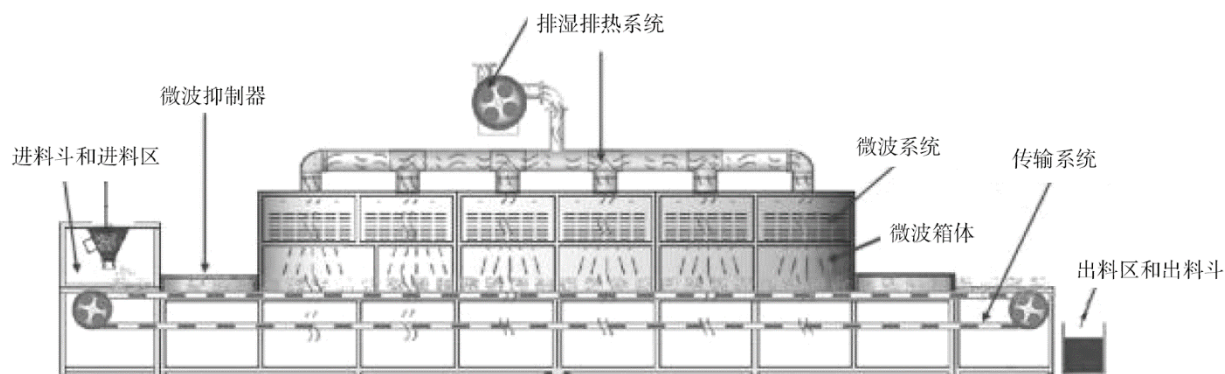


图 1 微波干燥的工作原理

Fig.1 Working principle of microwave drying

干制品较好的外观和提高产品品质,还能达到灭菌的目的。微波干燥的不足之一在于干燥的不均匀性,有研究者通过改变干燥设备提高干燥的均匀性。俞建峰等^[23]以胡萝卜为实验材料,在干燥的过程中通过增加转盘和搅拌扇片的速度来降低微波干燥的不均匀性,从而增加干燥的均匀性,达到更好的干燥效果。

2 果蔬微波冷冻干燥技术

2.1 原理和特点

果蔬在低温条件下水结冰,再转变为蒸汽而蒸发的过程称为果蔬冷冻干燥。由于该技术消耗的成本和能量较大,且干燥时间过长,导致其在果蔬干燥方面的应用受到限制。微波冷冻干燥技术不仅能降低生产成本,减少能量消耗和缩短干燥周期,还能使果蔬保持较好的营养物质含量、产品复水性和色香味^[24—29]。微波冷冻干燥技术是在低温、低压下将冻结在果蔬中的水分直接升华为水蒸气而散失,以达到干燥效果^[27]。由于微波冷冻干燥设备成本高,且优质品率较低,另外部分产品很难达到冷冻生产产品的质量要求,因而使其的推广应用受到限制。可以通过优化干燥工艺,以达到更好的脱水干燥效果。微波冷冻干燥技术被认为是传统冷冻干燥技术的替代品。

2.2 研究现状

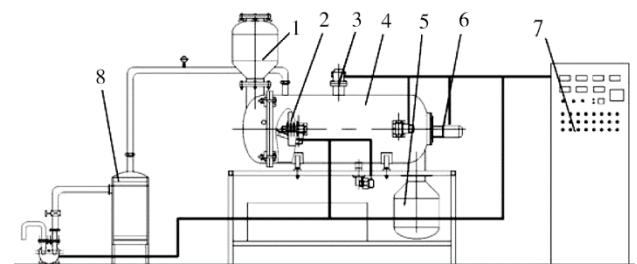
在果蔬干燥研究领域,相对于微波热风干燥和微波真空干燥而言,针对微波冷冻干燥的研究较少。微波冷冻干燥果蔬的优势主要集中在能维持较好的营养成分方面。江昊^[30]采用微波冷冻干燥和冷冻干燥技术对香蕉片进行对比研究,发现微波冷冻干燥技术的干燥效果更好,可减少能耗大约 33.8%,缩短干燥时间 40%,且更好地维持香蕉片的色香美和营养物质含量。吴翔等^[31]以刺梨为实验材料,研究微波冷冻干燥技术对其品质的影响,发现刺梨产品保持了较好的物理性状、外观形状和回复性,且可减少营养物质的流失。李伟等^[32]研究了杨梅果粉的干燥过程,发现采用微波联合冷冻干燥技术所得杨梅的色香味和营养成分含量保持效果最佳,香气损失最少,维生素 C 含量最高,产品的水分含量最低。刘文超^[33]研究表明,微波冷冻干燥微波密度(即微波密度与物流质量之比)对双孢菇干燥产品的外观和内在营养成分的影响更显著($P < 0.05$)。

3 果蔬微波真空干燥技术

3.1 原理和特点

真空干燥技术是在真空条件下,降低水的沸点,干燥果蔬时水分更容易达到蒸发的温度,从而加快了

干燥的速率,缩短了干燥时间。微波干燥技术则是果蔬在微波的辐射条件下,内部的分子产生运动,并产生热量,使得果蔬的温度上升,内部的水分散失,能够更快地实现干燥,缩短干燥时间。微波真空联合干燥技术克服了微波和真空的不足,结合了两者的优点,是一项新技术,相对于单一的干燥技术,进一步缩短了干燥时间,干燥后产品安全环保,能保持较好的微观结构、外观形状和营养品质^[34—37],其干燥的原理见图 2。



1.微波冻干仓 2.红外冻干仓 3.速冻仓 4.冷阱 5.热力膨胀阀
6.隔膜阀 7.截止阀 8.压缩机

图2 微波真空干燥的原理

Fig.2 Principle of microwave vacuum drying

3.2 研究现状

Monteiro^[38]、Nowacka^[39]、张向阳等^[40]研究了不同干燥技术对果蔬的效果,发现微波真空干燥技术具有时间较短、速度较快,还可提高产品的品质,干燥效果最佳。温建荣^[41]的研究结果表明,微波真空干燥的樱桃番茄干制产品色泽和营养成分的保留量最高,维生素 C 和番茄红素的质量分数分别可达到 82%和 65.2%;真空冷冻干燥技术的效果次之;热风干燥技术的效果较差。汪小嫖^[42]、黄艳斌^[43]等研究了微波真空干燥南瓜片、柠檬片,发现影响干燥效果的主要因素是切片厚度、微波强度和真空度。南瓜片通过微波真空干燥可获得较高的营养成分。郭正南^[44]研究了黄秋葵的质量、微波功率和真空度与产品多糖含量的关系,发现不同的质量、微波功率和真空度的搭配均可使多糖的含量达到最大值。仇干^[45]、刘娟^[46]、Weerachai 等^[47]将微波真空干燥技术分别用于紫马铃薯片、鲜地黄和红辣椒的干燥,发现真空度对干燥效果的影响较小,切片厚度和微波功率对干燥效果的影响最大,在一定微波功率范围内,功率越大,干燥的速度越快、时间越短。Krulis 等^[48]研究发现,草莓的初始含水率和微波功率的大小直接影响理化性质的好坏,要获得较好的理化性质,应该提高草莓的初始含水率和微波功率。Michalska^[49]、Candia-Muoz^[50]、王国锭等^[51]分别研究了不同的干燥技术对梅粉、蓝莓和洋葱粉性质的影响,研究发现微波真空干燥技术能获得较好质量的产品,干燥产品的色香味、外观形状保持效果最佳;在一定微波功率范围内,微波功率与

干燥的速度呈正相关,功率越大,果蔬干燥速度越快。优化干燥工艺以获得更佳的干燥产品是近几年研究的热点。周琦^[52]、付辉战^[53]、罗鸣等^[54]将微波真空干燥柠檬片、桑椹和青梅的工艺参数进行了优化,得出柠檬片最佳干燥工艺的微波功率和切片厚度分别为1.01 kW和4 mm,桑椹最佳干燥工艺的微波功率和切片厚度分别为3.0 kW,30 mm;当干燥温度为65℃左右,微波功率为2 kW时,青梅的外观最好,微波功率为1 kW时,达到最高的含糖量。

4 果蔬微波热风干燥技术

4.1 原理和特点

热风干燥对果蔬的影响较大,不仅营养损失严重,而且干燥的时间长,干燥环境温度和湿度难以控制。微波干燥不均匀,对干燥产品的品质影响较严重^[55]。微波热风干燥技术是根据不同干燥时期的需求,采取不同的方式进行干燥^[56],避免了耗时、营养成分严重损失和不均匀性干燥等问题的发生,不仅达到了干燥的目的,还保证了产品的质量。微波热风干燥技术不仅在外观品质和内在品质方面均具有较强的优势,还能够进一步缩短干燥时间,提高干燥效率;能够内外同时加热果蔬;干燥的成本低;既达到了干燥的目的,还具有杀菌的效果^[57]。相关研究表明,微波热风干燥技术的效果高于单一的热风干燥技术^[11]。

4.2 研究现状

王宸之^[58]、顾熟琴等^[59]研究结果表明,龙眼采用热风干燥技术的效率低于微波干燥技术的效率;热风干燥油枣,其黄酮含量与干燥时间、干燥温度以及油枣的质量密切相关,不同的干燥温度、干燥时间和油枣质量都会达到不同的干燥效果。彭郁等^[60]研究了间歇式微波干燥白胡萝卜,发现当干燥的白胡萝卜中心温度和表面温度相差最低,干燥效果最佳时,间歇比为5s/20s,热风温度为30℃。Vafith等^[61]研究发现,相较于单一的干燥技术,联合干燥技术较占优势。李湘利^[62]、刘清^[63]、王浩等^[64]研究发现,当热风温度和微波功率分别为60℃和550 W时,蒜片干燥产品的品质最好,干燥速率最快,感官品质较好;油菜籽在干燥温度和微波功率分别为80℃,500 W时,其含水率下降了0.49%,达到了快速干燥的效果;灰枣片的干燥温度为80℃,时间为4~5 h时,所获得干制品的干燥效果最好。Ilknur^[65]、雷苗^[66]、罗树灿^[67]、WANG等^[68]分别以南瓜脆片、木瓜粉、荔枝和香菇为干燥对象,综合考虑各种因素,确定微波热风干燥技术为最优的干燥方法,在此方法下,干燥产品的品质最佳,大大缩短了干燥的时间,干燥效果最好。相较于单一的热风干燥技术和微波干燥技术而言,采用微

波热风干燥技术的果蔬质量和性质较好,微波功率、热风温度和干燥时间对于微波联合热风干燥的效果影响较大,要想达到最佳的干燥效果,应根据不同果蔬的性质,确定不同的微波功率、热风温度和干燥时间。

5 果蔬微波联合干燥技术存在的问题和应用前景

通过干燥不仅解决了新鲜果蔬难贮藏、易腐烂变质等难题,还带来了更高的经济价值。传统的干燥方式主要采用单一的干燥技术。冷冻干燥消耗的成本和能量较高,且干燥时间较长;真空干燥不易控制水分和温度;热风干燥的温度过高,会造成挥发性成分的损失,以及酶活性的钝化;微波干燥不均匀,产品色泽和外观变化较大。干燥速度快,无热量和污染物残留,干燥产品具有较好的品质是微波干燥技术的最大优势^[8-9]。微波干燥果蔬能基本保持其原有的形状、色泽、味道和营养成分,食用方便,同时由于含水量较少,容易运输,贮藏时间长,能有效地调节蔬菜生产淡旺季,因此广泛应用于各种果蔬的加工过程中。微波联合干燥蔬菜的主要品种有胡萝卜、马铃薯、辣椒、油菜花、蒜、食用菌、白菜、甘蓝和姜等,干燥水果主要有苹果、柿子、蓝莓、南瓜、柠檬和香蕉等。

为获得更好的干燥效果,需要寻找有效的干燥方式,联合干燥技术是当前研究的一大热点。微波联合其他技术干燥,是将单一的干燥方式结合起来,弥补单一干燥的缺陷,发挥各自的优点,除去果蔬中的水分,达到干燥的目的,在干燥时间、能量消耗、生产成本,以及干燥产品的内外品质等方面均具有较大的优势^[69]。常见的微波联合干燥技术有微波联合冷冻干燥、微波联合真空干燥、微波联合热风干燥。微波联合冷冻干燥技术具有成本过高、能量消耗大、干燥时间长、生产力小等缺陷,导致该技术无法推广,从而限制了其发展。微波真空干燥技术无法监测水分和温度的变化。微波联合热风干燥技术具有加热不均匀等缺点。

微波联合干燥技术较好地克服了单一干燥技术的缺陷,具有很高的应用价值,相对于单一干燥技术而言,不仅能缩短果蔬干燥的时间,得到高品质的果蔬干制品,而且还能降低能量消耗。为了使干燥效果达到更佳,可对联合干燥工艺进一步进行优化,选择出最佳的干燥条件。

6 结语

微波联合干燥技术是果蔬采后干燥的关键技术,

干燥的果蔬不仅具有较好的色香味和品质,而且降低了果蔬的损失,提高了果蔬的市场经济价值。微波干燥技术果蔬干燥加工方面具有广阔的应用前景,是未来干燥加工行业发展的一个方向。

参考文献:

- [1] 孙术国. 干制果蔬生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 15—30.
SUN Shu-guo. Production Technology of Dried Fruits and Vegetables[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 15—30.
- [2] 江宁, 刘春泉, 李大婧, 等. 果蔬微波干燥技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2008(1): 216—219.
JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing, et al. Research Progress on Microwave Drying Technology of Fruits and Vegetables[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2008(1): 216—219.
- [3] 曹崇文. 微波真空干燥技术现状[J]. 干燥技术与设备, 2004(3): 5—9.
CAO Chong-wen. Current Status of Microwave Vacuum Drying Technology[J]. Drying Technology and Equipment, 2004(3): 5—9.
- [4] 段振华. 现代高新灭菌技术及其在食品工业中的应用研究[J]. 中国食物与营养, 2006(9): 28—30.
DUAN Zhen-hua. Modern High-tech Sterilization Technology and Its Application in Food Industry[J]. Chinese Food and Nutrition, 2006(9): 28—30.
- [5] 高福成, 冯鑫. 食品工程原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 138—147.
GAO Fu-cheng, FENG Mao. Principles of Food Engineering[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998: 138—147..
- [6] 应四新. 微波加热与微波干燥[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976: 5—16.
YING Si-xin. Microwave Heating and Microwave Drying[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1976: 5—16.
- [7] 张凡. 姜片的微波与热风联合干燥工艺及动力学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
ZHANG Fan. Microwave and Hot Air Combined Drying Process and Kinetics of Ginger Tablets[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [8] 段振华, 汪菊兰. 微波干燥技术在食品工业中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(1): 155—158.
DUAN Zhen-hua, WANG Ju-lan. Application of Microwave Drying Technology in Food Industry[J]. Food Research and Development, 2007, 28(1): 155—158.
- [9] 胡庆国. 毛豆热风与真空微波联合干燥过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2006.
HU Qing-guo. Study on Combined Drying Process of Hot Air and Vacuum Microwave of Soybean[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006.
- [10] 丁泽智, 杨晚生. 微波干燥技术的研究发展现状[J]. 应用能源技术, 2019(4): 40—43.
DING Ze-zhi, YANG Wan-sheng. Research and Development Status of Microwave Drying Technology [J]. Applied Energy Technology, 2019(4): 40—43.
- [11] 李红姣, 王志刚, 田洪涛. 用乙醇提取桑椹花青素的工艺优化及影响产品稳定性的因素分析[J]. 蚕业科学, 2017(6): 969—977.
LI Hong-jiao, WANG Zhi-gang, TIAN Hong-tao. Process Optimization of Extraction of Anthocyanin from Ethanol and Analysis of Factors Affecting Product Stability[J]. Sericulture Science, 2017, 43(6): 969—977.
- [12] 王也, 吕为乔, 李树君, 等. 农产品微波干燥技术与装备的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(3): 56—61.
WANG Ye, LYU Wei-qiao, LI Shu-jun, et al. Research Progress of Microwave Drying Technology and Equipment for Agricultural Products[J]. Packaging & Food Machinery, 2016, 34(3): 56—61.
- [13] 魏来. 白胡椒微波干燥特性及数学模型研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(5): 984—988.
WEI Lai. Microwave Drying Characteristics and Mathematical Model of White Pepper[J]. Journal of Tropical Crops, 2013, 34(5): 984—988.
- [14] 贾淞, 董铁有, 任广跃. 油菜花微波干燥工艺研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 174—176.
JIA Song, DONG Tie-you, REN Guang-yue. Microwave Drying Process of Rapeseed[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2018, 46(4): 174—176.
- [15] 刘梦迪, 张伟, 金传山, 等. 两种微波干燥方式对绿萼梅质量的影响[J]. 安徽中医药大学学报, 2018, 37(1): 87—90.
LIU Meng-di, ZHANG Wei, JIN Chuan-shan et al. Effects of Two Microwave Drying Methods on the Quality of Lycium Barbarum L[J]. Journal of Anhui University of Traditional Chinese Medicine, 2018, 37(1): 87—90.
- [16] 孔庆新, 祝冬青. 微波干燥法生产南瓜粉的研究[J]. 食品工业科技, 2006(9): 150—152.
KONG Qing-xin, ZHU Dong-qing. Study on the Production of Pumpkin Powder by Microwave Drying Method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006(9): 150—152.
- [17] CONCETTA C, FABRIZIO C, GIANLUCA T, et al. Influence of Drying Technologies on the Aroma of Sicilian Red Garlic[J]. LWT, 2019, 104: 180—185.
- [18] 马林强, 慕松, 李明滨, 等. 枸杞的微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农机化研究, 2015(5): 208—211.
MA Lin-qiang, MU Song, LI Ming-bin, et al. Microwave Drying Characteristics of Alfalfa and Its Effect on Quality[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(5): 208—211.
- [19] 王美霞, 刘斌, 王超, 等. 微波干燥过程中苹果切片的热质传递分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 10—14.
WANG Mei-xia, LIU Bin, WANG Chao, et al. Analysis

- of Heat and Mass Transfer of Apple Slices during Microwave Drying[J]. Food Research and Development, 2017, 38(21): 10—14.
- [20] 和珊, 丁超, 杨国峰, 等. 微波干燥对油菜籽品质及气味成分的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 48—54.
HE Shan, DING Chao, YANG Guo-feng, et al. Effects of Microwave Drying on the Quality and Odor Components of Rapeseed[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(1): 48—54.
- [21] 张怡, 曾绍校, 梁静, 等. 微波干燥对莲子主要品质的影响[J]. 中国食品学报, 2007, 7(4): 68—73.
ZHANG Yi, ZENG Shao-xiao, LIANG Jing, et al. Effects of Microwave Drying on Main Quality of Lotus Seeds[J]. Chinese Journal of Food Science, 2007, 7(4): 68—73.
- [22] 张芳, 康三江, 张永茂, 等. 当归微波干燥灭菌工艺优化研究[J]. 中国现代中药, 2017, 19(10): 1461—1465.
ZHANG Fang, KANG San-jiang, ZHANG Yong-mao, et al. Optimization of Microwave Drying and Sterilization Process of Angelica Sinensis[J]. Modern Chinese Medicine, 2017, 19(10): 1461—1465.
- [23] 俞建峰, 赵江, 陈海英, 等. 胡萝卜片微波干燥均匀性研究[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(4): 656—660.
YU Jian-feng, ZHAO Jiang, CHEN Hai-ying, et al. Study on Microwave Drying Uniformity of Carrot Slices[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 2018, 30(4): 656—660.
- [24] 牟婧婧. 微波冷冻干燥技术与应用[J]. 现代食品, 2018(24): 37—39.
MOU Jing-jing. Microwave Freeze Drying Technology and Application[J]. Modern food, 2018 (24): 37—39.
- [25] IRZYNIEC Z, KLIMEZAK J, MICHALOWSKI S, et al. Freeze-drying of the Black Currant Juice[J]. Drying-Technology, 1995, 13: 417—424.
- [26] 蓝浩, 周国燕. 果蔬冷冻联合干燥技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(2): 214—217.
LAN Hao, ZHOU Guo-yan. Research Progress in the Combined Drying Technology of Fruit and Vegetable[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(2): 214—217.
- [27] 段续, 张懋, 朱文学. 食品微波冷冻干燥技术的研究进展[J]. 化工机械, 2009, 36(3): 178—184.
DUAN Xu, ZHANG Min, ZHU Wen-xue. Research Progress of Food Microwave Freeze Drying Technology[J]. Chemical Industry, 2009, 36(3): 178—184.
- [28] 闫沙沙. 白蘑菇微波冷冻干燥质热传递过程研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
YAN Sha-sha. Study on the Heat Transfer Process of White Mushroom Microwave Freeze-drying[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [29] 李艳聪, 李书环. 真空冷冻干燥技术及其在食品加工中的应用[J]. 天津农学院学报, 2003(1): 42—45.
LI Yan-cong, LI Shu-huan. Vacuum Freeze-drying Technology and Its Application in Food Processing[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2003(1): 42—45.
- [30] 江昊. 切割香蕉的微波冷冻干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
JIANG Hao. Microwave Freeze Drying of Cut Bananas[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [31] 吴翔, 蔡金腾. 刺梨果微波冷冻干燥实验简报[J]. 山地农业生物学报, 2000, 19(1): 72—74.
WU Xiang, CAI Jin-teng. Brief Report on Microwave Freeze-Drying of Prickly Pear Fruit[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2000, 19(1): 72—74.
- [32] 李伟, 郜海燕, 陈杭君, 等. 不同干燥方式对杨梅果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 83—88.
LI Wei, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Effects of Different Drying Methods on the Quality of Bayberry Fruit Powder[J]. FOOD SCIENCE, 2017, 38(13): 83—88.
- [33] 刘文超. 双孢菇微波冷冻干燥(MFD)过程中品质控制的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
LIU Wen-chao. Study on Quality Control during the Microwave Freeze-drying (MFD) Process of Agaricus Bisporus[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [34] 蔡锦源, 巫先坤, 周黎明, 等. 微波真空干燥技术及设备[J]. 机电信息, 2011(14): 11—14.
CAI Jin-yuan, WU Xian-kun, ZHOU Li-ming, et al. Microwave Vacuum Drying Technology and Equipment[J]. Electromechanical Information, 2011 (14): 11—14.
- [35] 庄培荣. 龙眼肉微波真空干燥技术的研究[J]. 南方农机, 2017, 48(16): 64.
ZHUANG Pei-rong. Research on Microwave Vacuum Drying Technology of Longan Meat[J]. Southern Agricultural Machinery, 2017, 48(16): 64.
- [36] 裴斐. 双孢蘑菇冷冻干燥联合微波真空干燥传质动力学及干燥过程中风味成分变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
PEI Fei. Study on Mass Transfer Kinetics and Variation of Flavor Components in the Drying Process of Agaricus Bisporus Combined with Microwave Vacuum Drying[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [37] 黄建立. 银耳微波真空干燥机理及品质特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
HUANG Jian-li. Study on Microwave Vacuum Drying Mechanism and Quality Characteristics of Tremella[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [38] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Microwave Vacuum Drying and Multi-flash Drying of Pumpkin Slices[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 232:

- 1—10.
- [39] NOWACKA M, WIKTOR A, ANUSZEWSKA A, et al. The Application of Unconventional Technologies as Pulsed Electric Field, Ultrasound and Microwave-vacuum Drying in the Production of Dried Cranberry Snacks[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2019, 56: 1—13.
- [40] 张向阳, 乔方, 方长发, 等. 龙眼真空微波干燥过程中香气成分的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 81—84.
ZHANG Xiang-yang, QIAO Fang, FANG Chang-fa, et al. Study on Aroma Components in Longan Vacuum Microwave Drying Process[J]. Food Science and Technology, 2012, 33(3): 81—84.
- [41] 温建荣. 樱桃番茄的微波真空干燥研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
WEN Jian-rong. Microwave Vacuum Drying of Cherry Tomatoes [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [42] 汪小娉, 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的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 91—96.
WANG Xiao-ping, SONG Jiang-feng, LI Da-jing, et al. Effects of Vacuum Microwave Drying on Main Carotenoids in Pumpkin Slices[J]. Food Science, 2016, 37(21): 91—96.
- [43] 黄艳斌. 微波真空干燥对柠檬片干燥特性及品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
HUANG Yan-bin. Effect of Microwave Vacuum Drying on Drying Characteristics and Quality of Lemon Slices[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [44] 郭正南. 黄秋葵微波真空干燥技术的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
GUO Zheng-nan. Research on Microwave Vacuum Drying Technology of Okra [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [45] 仇干, 李雨杰, 王丹凤, 等. 紫马铃薯片真空微波干燥动力学及工艺优化[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(2): 70—75, 82.
QIU Gan, LI Yu-jie, WANG Dan-feng, et al. Vacuum Microwave Drying Kinetics and Process Optimization of Purple Potato Chips[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 36(2): 70—75.
- [46] 刘娟, 朱文学, 李汴生. 鲜地黄片的微波真空干燥工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 12(3): 237—239.
LIU Juan, ZHU Wen-xue, LI Bian-sheng. Microwave Vacuum Drying Process of Fresh Radix Tablets[J]. Food Industry Technology, 2012, 12(3): 237—239.
- [47] WEERACHAI K, SOMCHAI W. Combined Microwave Fluidized Bed Drying of Fresh Pepper C01TIS[J]. Drying Technology, 2004, 22(4): 779—794.
- [48] KRULIS M, KUEHNERT S, LEIKER M, et al. Influence of Energy Input and Initial Moisture on Physical Properties of Microwave-vacuum Dried Strawberries[J]. European Food Research & Technology, 2005, 221(6): 803—808.
- [49] MICHALSKA A, WOJDYLO A, LECH K, et al. Physicochemical Properties of Whole Fruit Plum Powders Obtained Using Different Drying Technologies[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 223—232.
- [50] CANDIA-MUOZ N, RAMIREZ-BUNSTER M, VARGAS-HERNANDEZ L, et al. Ultrasonic Spray Drying vs High Vacuum and Microwaves Technology for Blueberries[J]. Physics Procedia, 2015, 70: 867—871.
- [51] 王国锭, 黄昊, 束庆, 等. 不同干燥方法对黄洋葱粉品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 89—94.
WANG Guo-ding, HUANG Hao, SHU Qing, et al. Effects of Different Drying Methods on the Quality of Yellow Onion Powder[J]. Preservation and Processing, 2019, 19(1): 89—94.
- [52] 周琦, 彭林, 陈厚荣. 响应面法优化柠檬片微波真空干燥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 186—193.
ZHOU Qi, PENG Lin, CHEN Hou-rong. Optimization of Microwave Vacuum Drying Process of Lemon Slices by Response Surface Methodology[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4): 186—193.
- [53] 付辉战, 胡腾, 邹宇晓, 等. 新鲜桑椹采用真空微波干燥加工的特性及品质变化研究[J]. 蚕业科学, 2018, 44(3): 427—434.
FU Hui-zhan, HU Teng, ZOU Yu-xiao, et al. Study on the Characteristics and Quality Changes of Fresh Mulberry Using Vacuum Microwave Drying Process [J]. Sericulture Science, 2018, 44(3): 427—434.
- [54] 罗鸣, 张桂容, 罗钰婕, 等. 不同干燥方式对青梅品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(10): 152—159.
LUO Ming, ZHANG Gui-rong, LUO Yu-jie, et al. Effects of Different Drying Methods on the Quality of Green Plum[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(10): 152—159.
- [55] SUN Jian-hua, WANG Heng, LIU Bei, et al. Rutin attenuates H₂O₂-Induced Oxidation Damage and Apoptosis in Leydig Cells by Activating PI3K/Akt Signal Pathways[J]. Biomed Pharmacother, 2017, 88: 500—506.
- [56] 刘胜平. 莲子热风与微波控温干燥动力学研究及联合干燥工艺参数优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
LIU Sheng-ping. Study on the Kinetics of Hot air and Microwave Controlled Drying of Lotus Seeds and Optimization of Joint Drying Process Parameters[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [57] 崔政伟, 陈丽君, 宋春芳, 等. 热风微波耦合干燥技术和设备的研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(11): 1121—1128.
CUI Zheng-wei, CHEN Li-jun, SONG Chun-fang, et al. Research Progress of Hot Air Microwave Coupling Drying Technology and Equipment[J]. Journal of Food

- Science and Biotechnology, 2014, 33(11): 1121—1128.
- [58] 王宸之, 邓自高, 李琳, 等. 热风 and 微波干燥对龙眼品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(4): 429—436.
- WANG Chen-zhi, DENG Zi-gao, LI Lin, et al. Effects of Hot Air and Microwave Drying on the Quality of Longan[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(4): 429—436.
- [59] 顾熟琴, 盛文军, 卢大新. 热风干燥和微波干燥对油枣总黄酮含量影响的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(11): 154—157.
- GU Shu-qin, SHENG Wen-jun, LU Da-xin. Study on the Effect of Hot Air Drying and Microwave Drying on the Content of Total Flavonoids in Jujube[J]. Food Science, 2004, 25(11): 154—157.
- [60] 彭郁, 赵丹丹, 李莱, 等. 白萝卜间歇微波热风耦合干燥过程干燥特性分析(英文)[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 85—93.
- PENG Yu, ZHAO Dan-dan, LI Mo, et al. Analysis of Drying Characteristics of Intermittent Microwave Hot Air Coupling Drying Process of White Radish[J]. Food Science, 2017, 38(17): 85—93.
- [61] VARITH J, DIJKANARUKKUL P, ACHARIY-AVIRIYA A. Combined Microwave-hot Air Drying of Peeled Longan[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 459—468.
- [62] 李湘利, 刘静, 朱乐乐, 等. 热风、微波及其联合干燥对蒜片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 136—140.
- LI Xiang-li, LIU Jing, ZHU Le-le, et al. Effects of Hot Air, Microwave and Their Joint Drying on the Quality of Garlic Slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 136—140.
- [63] 刘清, 吴美芳, 赵玉强, 等. 热风-微波联合干燥对油菜籽品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 180—183.
- LIU Qing, WU Mei-fang, ZHAO Yu-qiang, et al. Effects of Hot Air-microwave Drying on the Quality of Rapeseed[J]. Food and Machinery, 2017, 33(7): 180—183.
- [64] 王浩, 张明, 王兆升, 等. 不同干燥方式对灰枣片感官及营养品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(6): 102—107.
- WANG Hao, ZHANG Ming, WANG Zhao-sheng, et al. Effects of Different Drying Methods on Sensory and Nutritional Quality of Gray Jujube Tablets[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 102—107.
- [65] ILKNUR A. Microwave, Air and Combined Microwave-air-drying Parameter of Pumpkin Slices[J]. LWT-Food Science and technology, 2007, 40(8): 1445—1451.
- [66] 雷苗, 蔡杰, 何静仁. 不同干燥方法对光皮木瓜全粉品质的影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(1): 6—10.
- LEI Miao, CAI Jie, HE Jing-ren. Effects of Different Drying Methods on the Quality of Papaya Powder[J]. Journal of Wuhan University of Light Industry, 2018, 37(1): 6—10.
- [67] 罗树灿, 李远志, 蔡国富, 等. 荔枝结合干燥工艺的初步研究[J]. 农产品加工, 2018(14): 27—29.
- LUO Shu-can, LI Yuan-zhi, CAI Guo-fu, et al. Preliminary Study on the Combined Drying Process of Litchi[J]. Processing of Agricultural Products, 2018(14): 27—29.
- [68] WANG Qing-fa, LI Song, HAN Xue, et al. Quality Evaluation and Drying Kinetics of Shitake Mushrooms Dried by Hot Air, Infrared and Intermittent Microwave-assisted Drying Methods[J]. LWT, 2019, 107: 236—242.
- [69] 张慙, 徐艳阳, 孙金才. 国内外果蔬联合干燥技术的研究进展[J]. 无锡轻工业大学学报: 食品与生物技术, 2003, 22(6): 103—106.
- ZHANG Min, XU Yan-yang, SUN Jin-cai. Research Progress of Joint Drying Technology of Fruits and Vegetables at Home and Abroad[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry: Food and Biotechnology, 2003, 22(6): 103—106.