

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.027

陈鹏泉, 郭相毅, 陈楠, 等. 花生荚果干燥技术及设备的研究现状与发展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 221-230.

CHEN P X, GUO X Y, CHEN N, et al. Research status and development of peanut fruit drying technology and equipment[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 221-230.

花生荚果干燥技术及设备的 研究现状与发展

陈鹏泉, 郭相毅, 陈楠, 王殿轩, 刘晓莉, 吴建章, 朱文学✉

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 花生作为世界重要的油料之一, 在农作物中占据举足轻重的地位。刚收获的新鲜花生荚果由于水分较高易受到多种因素影响而导致霉变并产生黄曲霉毒素, 从而影响使用安全并降低花生的经济价值。花生荚果收获后及时干燥可有效抑制微生物和霉菌的生长及繁殖, 降低环境温湿度对花生储藏的影响, 更大限度的保证花生的品质和使用安全。归纳了国内外花生荚果干燥技术与装备的研究现状, 介绍了花生荚果的各种干燥方法和相应的干燥设备, 总结了现存的主要问题, 提出了相关研究建议, 为花生荚果干燥技术装备研究提供了参考。

关键词: 花生荚果; 干燥技术; 干燥设备; 干燥工艺; 联合干燥

中图分类号: S565.209.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)02-0221-10

Research Status and Development of Peanut Fruit Drying Technology and Equipment

CHEN Peng-xiao, GUO Xiang-yi, CHEN Nan, WANG Dian-xuan, LIU Xiao-li,
WU Jian-zhang, ZHU When-xue✉

(College of Food Science and Engineering, Henan University of technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: As one of the important oil crops in the world, peanuts occupy a pivotal position in crops. Fresh harvested peanut fruit are susceptible to mildew and aflatoxins due to their high moisture content, thus affecting the safety of use and reducing the economic value of peanuts. The timely drying of peanut fruit after harvest can effectively inhibit the growth and reproduction of microorganisms and molds, reduce the effects of environmental temperature and humidity on peanut storage, and ensure the quality and safety of peanuts. This paper summarizes the research status of peanut fruit drying technology and equipment at home and abroad, introduces various drying methods of peanuts fruit and corresponding drying equipment, sum up the existing problems, proposes relevant research recommendations, providing reference for peanut fruit drying technology equipment research.

Key words: peanut fruit; drying technology; drying equipment; drying process; combined drying

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 国家现代农业产业技术体系: 国家花生产业技术体系资助项目(CARS-13); 基于离散-连续介质的仓储粮堆通风干燥湿热传递机制研究(21A550003)

Supported by: National Modern Agricultural Industry Technology System: National Peanut Production Technology System Funding Project (No. CARS-13); Study on Warehouse Grain Ventilation Dry and Damp Heat Transfer Mechanism Based on Discrete-Continuous Media (No. 21A550003)

作者简介: 陈鹏泉, 男, 1992年出生, 博士, 讲师, 研究方向为粮食通风与干燥研究。E-mail: cpx2020@haut.edu.cn.

通讯作者: 朱文学, 男, 1967年出生, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工与贮藏、粮油干燥贮藏研究。E-mail: zwx@haut.edu.cn.

花生是世界上植物油的主要来源之一。根据美国农业部 (USDA) 数据库资料显示,花生在九种主要油料作物中的植物油产量中排名第五^[1]。花生富含脂肪和蛋白质,每 100 g 花生可提供 567 kcal 能量和 8.5 g 膳食纤维。另,花生富含矿物质、维生素、抗氧化剂以及改善生物活性化合物(如白藜芦醇、生育酚、精氨酸等),可降低患糖尿病、癌症、老年痴呆和胆结石的风险。与其他植物油料相比,花生的种植面积更广、种植效益更高、含油量更高(脂肪含量 50%)、油脂中营养成分的含量也更高^[2-3]。

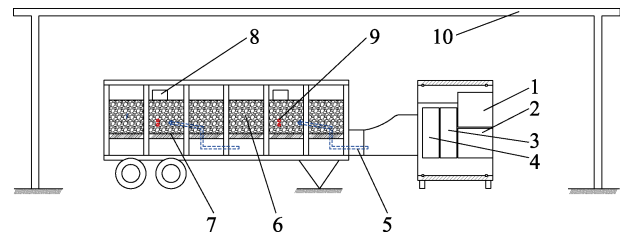
刚收获的花生荚果,水分在 50%左右,呼吸作用仍在进行,且花生收获在多雨的季节,长期堆垛存放得不到及时干燥易发生霉变,产生黄曲霉毒素,可致癌。近年来,花生种植规模以及年总产量均在不断提高,花生产后干燥显得尤为重要。通过不同干燥方式对花生荚果进行干燥,可以应对不同初始条件下的高水分花生荚果,也可以保证花生的品质,减少花生的不必要损失^[4-5]。使用不同的干燥方法、应用不同的干燥设备进行干燥的花生品质也不尽相同^[6-7]。

本文分析了花生荚果干燥的研究现状,介绍了花生荚果的各种干燥技术和相应的干燥设备,以期为我国花生荚果干燥的发展以及先进设备的研发提供有效参考。

1 花生荚果干燥技术及设备发展现状

美国、日本和欧洲等西方发达国家优先进入机械化时代,花生干燥的机械化程度已达 95%以上^[8]。以美国为例,花生从收获干燥直至最终储藏的一整套系统依赖于机械化设备^[9]。收获时先由花生起收机将花生挖出,挖出的花生荚果朝上放置在田间晾晒至含水率为 20%左右,再由花生捡拾收获机将晾晒过的植株捡起并摘果和清洗;收获后的花生荚果就地装入干燥车,并被运送至附近的干燥站统一进行干燥,直至达到安全水分;干燥完成后的花生荚果被运送到储藏点进行储藏^[10]。从收获到储藏的一系列过程较直接的对花生荚果进行了干燥,具有经济高效、简单适用的特点。其中,干燥系统是由干燥棚、干燥车、加热鼓风机装置、传感器及控制系统组成(如图 1)。就能源

利用角度来看,在干燥处理的过程中充分利用太阳能,相比于全部干燥过程使用机械烘干更节能高效^[11]。



1. 燃料罐(如丙烷) 2. 控制单元 3. 鼓风机 4. 加热单元 5. 进风口 6. 花生荚果物料层 7. 冲空板 8. 出风口传感器 9. 进风口传感器 10. 干燥棚

1. Fuel can (such as propane) 2. Control unit 3. Blower 4. Heating unit 5. Air inlet 6. Peanut fruit layer 7. Orifice plate 8. Air outlet sensor 9. Air inlet sensor 10. Drying shed

图 1 花生荚果干燥车示意图

Fig.1 Schematic diagram of peanut fruit drying in wagons

美国具有高机械化水平,但科研人员仍在寻找提高干燥效率的方法。M. A. Lewis^[12]等通过部署两个花生荚果干燥监控系统,监控频率为 12 s/次进行实时比较分析,结果表明某些情况下,干燥车两端的水分损失含量是不同的,可以通过在干燥车不同位置安装花生荚果干燥监控系统来进行实时把控,进而提高花生荚果干燥效率和品质,还通过安装花生荚果干燥监控系统来估计了干燥机的不利成本^[13]。Claudia Antonia Vieira Rossetto 等^[14]研究了花生收获时间和干燥方式对黄曲霉毒素产生的影响,结果表明干燥至水分含量为 8% 时能有效地防止各种霉菌的产生。

英国的 Ellis^[15]研究发现花生种子的含水率越低越有利于延长储藏寿命,William Dias Araujo 等^[16]评估了干燥对花生物理特性的影响,发现含水率的降低可以降低花生所有的物理特性,但是比表面积却有所增加。巴西的 Andre L. D. Goneli 等^[17]对花生荚果薄层干燥的数学模型进行了调整,以适应花生仁薄层干燥的实验数据。

与西方发达国家相比,国内的干燥技术起步较晚,用于花生荚果干燥的技术和设备仍处于研发阶段,缺少专属的花生干燥设备,种植户缺乏干燥知识,以至于我国的花生荚果主要通过自然干燥法干燥^[18](如图 2),少部分地区采用机械干燥。

随着科技的发展与研究的深入,国内许多学者对花生干燥技术的研究取得了一定的进展与突

破^[19]。Chenling Qu 等^[20]研究了花生荚果的干燥特性,建立了花生荚果深床干燥含水率预测模型,以辅助实际的干燥过程。王仕琪^[21]以花生荚果干燥过程为研究对象,建立了花生荚果干燥过程中湿热传递的数学模型,基于 FLUENT 的 UFD 功能编写了相应的自定义程序,对干燥过程进行了模拟计算和实验验证,证明了数学模型和 UFD 程序的正确性。王殿轩^[22]发明了一种包含可承载可透气的料床的辅热烟囱效应花生荚果抑菌干燥装置,设备利用集热装置采集的热量促进形成烟囱效应快速带走料堆内部产生的湿热,并且具有抑菌作用,符合种植户的干燥需求。王凤军^[23]也发明了一种结构合理、干燥效果好的花生荚果干燥设备,干燥箱体包括预加热室和加热室,花生荚果通过倾斜的输送辊道向下翻滚的时候进行预加热,随后进入加热室进行干燥,这种干燥设备大大提高了干燥效率。



图2 花生荚果自然干燥图

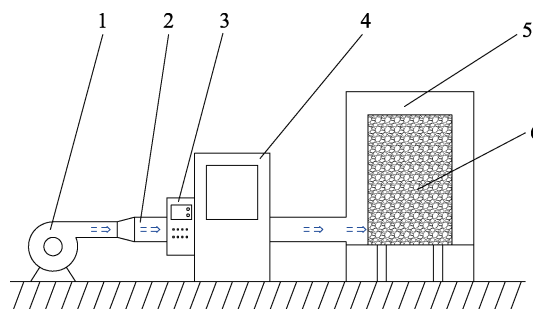
Fig.2 Peanut fruit natural drying

2 各类花生荚果干燥技术及装备

2.1 热风干燥

热风干燥是花生荚果机械干燥的主要方法之一,通用的热风干燥设备(如图3)主要由加热鼓风机装置、传感器、控制系统、干燥室组成。热风干燥技术是依据传热传质原理,以某种能源(化石能源、电能等)提供热源,再通过风机将加热空气吹入所使用的干燥设备用以烘干物料。当热空气与湿物料接触后,物料表面的水则会吸收热空气的热量,水会气化变为水蒸气扩散在环境中,物料表面水分则低于其内部水分,从而形成由内

而外从高到低的水分梯度,同时物料水分会由内向外扩散,直到物料中的水分达到一定程度此过程趋于停止^[24]。



1. 鼓风机 2. 通风管 3. 控制单元 4. 加热单元 5. 干燥室 6. 花生荚果物料

1. Blower 2. Ventilation tube 3. Control unit 4. Heating unit 5. Drying room 6. Peanut fruit material

图3 花生荚果热风干燥示意图

Fig.3 Schematic diagram of peanut fruit hot air drying

在热风干燥的研究历程中,风温和风速是重要的技术参数。Chenling Qu 等^[25]研究了不同干燥温度对花生荚果品质的影响,研究发现,花生荚果采用 45 °C 以下的热风进行干燥时,能较好保证其干后品质。Karina Laís Leite Sarath^[26]等将收获的花生在 40、50、60 和 70 °C 条件下储藏 150 d,并记录其含水量变化,分析在 40 °C 的空气温度下干燥花生种子可以提高种子的储藏时间和发芽率。通过花生荚果薄层干燥实验建立干燥动力学模型是花生荚果干燥特性研究的常用手段,林子木^[27]等通过花生荚果薄层干燥实验发现:花生荚果干燥过程中,温度、风速越高,花生干燥速率越快,干燥用时越短;温度对花生荚果干燥过程的影响大于风速对花生荚果干燥过程的影响。王安建^[28]除了研究风速和风温对花生荚果干燥的影响外,还研究了装料量对花生干燥过程的影响,研究发现,随着风温的升高、装料量的减少和风速的增加,花生荚果干燥时间随之缩短,可以通过在干燥初期适当增加风温和风速来提高花生荚果干燥效率。Shiwei Mao 等^[29]在不同干燥温度、湿度和空气流速条件下对 Middleton 和 Sutherland 两个花生品种进行薄层干燥,对比发现在花生荚果干燥过程中干燥温度是最主要的条件,不同湿度下两种花生荚果的干燥率无显著差异。

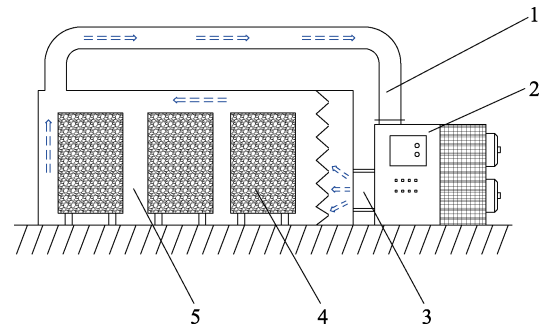
受到花生理化因素影响,目前可用于花生机械热风干燥的设备主要有翻板式干燥机、回转圆

桶式干燥机、烘干塔式干燥机以及就仓式干燥机^[30]。张鹏^[31]设计了一种连续立式花生荚果干燥机，包括连续立式花生荚果干燥机的电器控制系统，并通过实验得出最佳的干燥工艺参数为：风温 50℃、风速 1.5 m/s、干燥时间 12 h，使用该干燥机大大降低了人工劳动，提高了干燥效率，为花生荚果干燥设备的研发提出重要的思路。为了保证花生荚果收货后的品质，提高热风干燥效率，Shiyu Zeng 等^[32]建立了一种基于叠加变温控制技术的干燥机，建立了一种基于叠加变温控制技术的花生荚果干燥机，使用 70、90、110℃ 热风对 60 mm 厚的花生样品层进行干燥，并监控干燥过程中温湿度的变化，研究发现，在热风干燥初期花生荚果的温度分布不均匀，随着干燥进行，温度分布逐渐趋于均匀。王清光^[33]设计了一种分段式的花生荚果干燥塔，此干燥塔可以使热风均匀的穿过花生荚果，即简化了干燥工艺、节约了能量，又提高了干燥的品质。陈鹏泉^[34]发明了一种滚筒型高效干燥装置，该装置集清洗和干燥于一体，包括第一清洗机、第二清洗机、烘干箱和烘干转筒，清洗过花生在滚筒和滚筒内搅拌杆的双重搅拌下可以充分的与热风进行接触，可达到高效的干燥效果。王殿轩^[35]发明了一种径向通风花生荚果干燥仓，该仓体顶部有活体封盖，侧壁布满通风口，中心部位安装通风笼；风从底部进入通风笼，通过较短途径的径向气流流动带走仓内花生荚果的水分，实现花生在仓内快速干燥。

2.2 热泵干燥

热泵是一种自身先消耗一定能量从低温热源中获取能量，使其在高温下释放出可利用热能的装置，常用的热泵干燥装置（如图 4）由蒸发器、压缩机、冷凝器、干燥箱等组成。热泵干燥技术通过干燥介质（空气、二氧化碳^[36]、氮气^[37]）的加热、冷凝、除湿，对干燥介质和热量不断循环回收利用，是一种节能环保、成本低廉、干燥效果好的干燥技术，符合现在干燥技术的发展方向，已经具体应用在了谷物^[38-40]、果蔬^[41-42]以及其他物料的干燥中^[43-44]。王安建^[39]等研究了花生荚果热泵干燥特性及动力学模型，通过研究风速和温度对花生荚果干燥的影响，得出当烘干箱内温度越高，干燥到要求水分所需要的时间越短的结论。

由于新鲜花生荚果干基含水率高，大都是自由水，受热易蒸发扩散至周围环境，所有采用干燥速率先增大再减小的干燥方式，可以在干燥的前期加大设备功率提高干燥温度，以提高设备的效率，同时在干燥后期通过降低干燥温度来实现节能降耗和保持干燥品质。



1. 回风管道 2. 烘干主机 3. 进风管道 4. 花生荚果物料 5. 干燥室
 1. Return air duct 2. Dry host 3. Pipeline of air inlet 4. Peanut fruit material 5. Drying room

图 4 花生荚果热泵干燥示意图

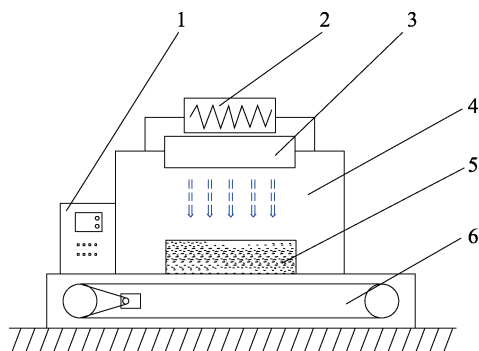
Fig.4 Schematic diagram of peanut fruit heat pump drying

热泵干燥法作为干燥效率高、干燥品质好的一种机械干燥方法，已经运用在伊朗的果蔬干燥中，Fakhreddi Salehi^[45]通过研究提出了适合于不同水果作物高强度干燥的数学模型。Thing Chai Tham 等采用太阳能干燥、太阳能间歇热泵干燥、热风干燥以及空气源热泵干燥四种干燥方式对玫瑰茄进行干燥，并对其干燥动力学和干后品质进行了研究，通过分析了不同干燥方式对其干燥速率、颜色和化学成分变化的影响，发现空气源热泵干燥的干燥速率最高，且干后玫瑰茄的颜色无明显变化^[46]。

热泵干燥的方法比较适合我国南部气温较高的地区使用，针对我国北部东北地区寒冷气候特点及多段塔式燃煤干燥系统存在的高能耗、高污染问题，Li Weizhao^[47]等开发了一种热管联合多级串联玉米热泵干燥系统，该系统能够实现对多段塔式燃煤干燥系统中废气的余热回收和废气中杂质的清洁处理，依此达到节能减排的效果，该研究为热泵干燥技术在粮食烘干领域的应用提供了参考。热泵干燥技术也正逐步应用在美国花生荚果机械化干燥中，例如 DaikaDDG8000 花生热泵机组，适用于美国花生荚果干燥车，该热泵机组相比于其他干燥方法更节能高效^[48]。

2.3 微波干燥

20世纪末期,微波干燥技术随着大功率磁控管的研发在全球广泛普及。在微波的照射下物料中的水分子有序排列。由于工业用电和生活用电均属交流电,因此加持在物料两端的电场方向不断变化,从而导致偶极子方向转变且在分子间作用力阻碍下产生热量。微波干燥具有节能高效、加热均匀、环保、控制方便等优点,一般微波干燥装置(如图5)是由微波源、控制单元、冷却单元、干燥室、花生荚果物料、传送带等几个部分组成。



1. 控制单元 2. 冷却单元 3. 微波源 4. 干燥室 5. 花生荚果物料 6. 传送带

1. Control unit 2. Cooling unit 3. Microwave source 4. Drying room 5. Peanut fruit material 6. Conveyor belt

图5 花生荚果微波干燥示意图

Fig.5 Schematic diagram of peanut fruit microwave drying

为了开发基于微波和射频加热的先进干燥方法,Shuang Zhang等^[49]研究了电磁场和花生荚果之间的相互作用,研究表明介电常数和损耗因子随微波频率的增加而增大,并通过实验和模拟确定了射频加热样品在不同湿度下的温度分布,为花生荚果介电特性的研究提供了有益指导。董铁有^[50]等对均匀平铺的典型载荷条件下微波干燥室的反射特性和能量分布特性进行了研究,研究显示,不同种类物料的介电常数不同,使得干燥室在其他条件相同的情况下表现出不同的功率反射特性,所以在均匀平铺载荷状态下,物料存在临界厚度,此研究为探索花生荚果微波干燥的临界厚度提供了重要的基础。

D. Boldor等^[51]研发了花生荚果连续微波干燥的过程控制系统,系统可以根据需要调节干燥机内微波功率。而后,D. Boldor等^[52]又研究了花生荚果在平面微波辐照器中连续干燥的传热传质模型,由模型模拟结果与实测温度分布相吻合。

陈霖^[53]使用自制控温微波干燥设备研究了常规微波干燥和温控微波干燥条件下干后花生荚果品质差异,结果表明,控温微波功率在1.2 W/g且温度在45~50℃进行干燥的花生品质最好,此工艺大大改善了常规微波干燥易导致物料焦糊的现象。

目前,我国微波干燥技术尚未成熟,亟待探索^[54-55]。

2.4 真空干燥

真空干燥是将物料放在密闭空间中,将空间中的空气抽出,形成一个真空空间的同时对物料加热,使物料中的水分受到压力差以及浓度差向表面迁移,克服分子间的作用力后,扩散至真空环境中,最终被真空泵抽出^[56]。物料在正常大气压下和在密闭的真空空间中进行干燥其所含水分的相变过程一致,然而物料所在空间压强是不同的,在真空中汽化的水蒸气更容易扩散至周围的真空环境中,加热物料所需的温度就越低,就更节约成本。

武洪博^[57]基于水势理论建立了花生真空干燥数学模型,通过模拟和实验验证,得出结论为,干燥速率与真空度和干燥温度成正比。武洪博^[58]根据水势理论建立了花生种子在真空干燥条件下传热传质数学模型,研究表明,相比于干燥真空度,干燥温度对干燥速率的影响更大,相对于传统热风干燥,真空干燥设备更经济更环保。

塔形连续式真空干燥设备成功的应用于花生荚果干燥中^[59]。徐成海^[60]等以塔形连续干燥设备为研究对象,从传热、设备结构、配套装置和能源利用的角度分析了节能减排的方向与途径。何翔等^[61]研制出一种低温真空连续干燥塔式设备,依据固体颗粒物料流动理论,花生荚果靠重力在换热管之间自上而下的S形流动中被加热。实验证明,大批量的花生荚果在异形加热管之间流动顺畅,加热均匀,干燥后水分一致。

2.5 太阳能热风干燥

太阳能热风干燥是利用太阳能集热装置和太阳辐射进行的一种干燥方法,物料表面获得热量后,热量由表面传入物料内部,使物料所含水分从内部向表面扩散,水分再通过物料表面的气膜扩散至空气中,此过程不断重复,直至达到安全

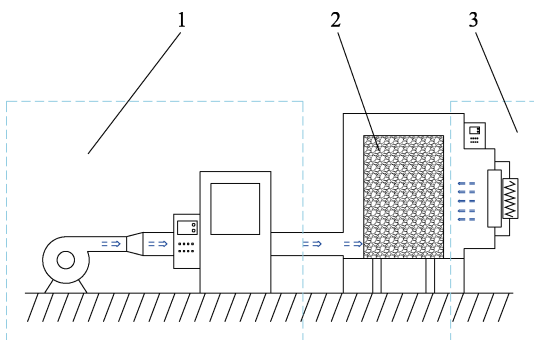
储藏标准水分。

阿尔及利亚的 D. Mennouche^[62]为了研究在阿尔及利亚瓦尔格拉地区的花生荚果干燥特性,设计了一种经济有效、适用性广的间接式自然对流太阳能干燥机,并对此进行了试验研究,研究发现采用间接太阳干燥机干燥的花生荚果,不受昆虫、雨水和灰尘的影响,干后花生荚果含油量较高。张国良^[63]研究了花生荚果太阳能干燥装置的各个部分及其工作原理,并通过仿真模拟软件 TRNSYS 分析了太阳能集热器的集热性能,利用 FLUENT 分析了干燥室内部风速的分布情况。杨柳^[64]等设计了一种太阳能集热为主、电能为辅的花生荚果太阳能干燥设备,使用 TRNSYS 软件对花生太阳能干燥设备集热系统的集热性能进行了模拟仿真。研究结果得出,实验对比分析与仿真结果基本吻合,太阳能热风干燥花生荚果装置集热器的集热性能良好。

2.6 联合干燥

联合干燥是通过对物料自身特性的分析,选取两种或两种以上的干燥方法复合而成,分阶段进行干燥的一种干燥技术。

单一的干燥方法都有自己的优缺点,如热风干燥成本较低、操作简单,但干燥所得物料品质低、干燥时间长^[65-66];微波干燥加热均匀、控制方便,但其耗能高、成本较大^[67-68]。因此将两种干燥方法组合,既能弥补双方不足,又结合两种方法的优点,可以大大降低干燥成本、提高干燥效率,如图6为花生荚果热风-微波联合干燥装置。



1. 热风源 2. 干燥室及物料 3. 微波源
 1. Hot air source 2. Drying room and material 3. Microwave source
 图6 花生荚果热风-微波联合干燥示意图

Fig.6 Schematic diagram of peanut fruit hot air-microwave combination drying

王招招^[69-70]等对花生荚果微波-热风耦合干

燥法进行了分析,研究得出脉冲间歇式-高&低强度,微波强度 0.9 W/g、风速 0.5 m/s、风温 40 ℃ 为最佳干燥工艺条件。凌铮铮^[71]等对花生荚果间歇微波-热风耦合干燥工艺进行了研究,得出最佳工艺条件为:热风温度 45 ℃、微波强度 1.25 W/g、微波间歇比 1.10。张壁光^[72]对木材进行了太阳能热风-热泵联合干燥的研究,太阳能热风与热泵二者联合可以减小因气候变化而造成的影响、提高干燥效率,相比于常规干燥联合干燥的节能在 70%左右。纵伟^[73]等分别研究了热风、真空、微波和微波联合真空对花生荚果干后品质的影响,对比发现,微波联合真空干燥时间最短、花生干后品质最好。王童^[74]采用热风干燥、微波干燥以及微波热风联合干燥对花生荚果干燥,对比了三种干燥方法对花生营养品质的影响,结果表明,微波热风联合干燥法干燥时间最短,干后品质最优。朱凯阳^[75]等采用热风、微波和微波冷冻三种干燥方式对花生荚果进行干燥,并分析不同方式对花生干后品质的影响,结果表明,花生荚果微波冷冻干燥后品质最好。

3 花生荚果干燥存在的问题

1) 干燥工艺优化同干燥设备发展之间不平衡。

近些年,花生荚果干燥的研究集中体现在干燥工艺和特性上,而对花生荚果干燥设备的研究却少之又少,导致在干燥工艺上的优化难以在设备上体现出来。

2) 通用干燥设备应用受限,专用干燥设备研究不足。

花生荚果干燥的应用方法与技术良多,但在应用过程中,考虑到能源消耗、环境保护与干燥品质等问题,通常将传统的通用干燥设备直接应用推广,这导致高效优质的干燥目标无法实现。而我国的花生荚果干燥设备处于研发阶段,市场上专用的花生荚果干燥设备较少且缺少成熟的标准化产品。

3) 现有干燥技术及设备在种植户群体中得不到充分应用。

国内花生荚果干燥技术水平有限,干燥工艺与干燥设备不匹配,干燥效率不稳定,且对种植户群体的技术服务不到位,导致种植户难以利用现有干燥技术及装备。

表1 不同干燥技术装备对照(工艺参数、性能、特点)

Table 1 Equipment control (process parameters, performance, characteristics) in different drying technology

干燥方法设备	工艺参数	性能	特点
热风干燥技术设备	风温(℃)、风速(m/s)、料层厚度(cm)、干燥时间(h)	热风干燥设备集空气加热、热空气传输合干燥等设施于一体;采用独立控制系统,控制方便。	热空气与花生直接接触,传热表面积大;处理量大;操作方便,结构简单。
热泵干燥技术设备	风温(℃)、风速(m/s)、料层厚度(cm)、干燥时间(h)	热泵干燥设备包括蒸发器、压缩机、冷凝器、干燥箱;温湿度自控、自动加热。	可循环、回收干燥介质及能量;高效节能;环境友好。
微波干燥技术设备	微波功率(w)、微波功率与装载量比(w/g)、干燥时间(h)	微波干燥设备主要由微波源、控制单元、冷却单元、干燥室等组成;可手动、自动双重操作,精确控制温湿度变化。	干燥均匀;节能高效;环保;操作方便、易于控制。
真空干燥技术设备	干燥温度(℃)、真空度(Mpa)、料层厚度(cm)	真空干燥设备是包含干燥柜、冷凝系统和真空泵三个部分;降低能耗、减少污染。	水分易于蒸发,干燥时间短;减少花生与空气接触,避免污染;真空度和温度调节范围较大。
太阳能热风干燥技术设备	集热器面积(m ²)、热交换器面积(m ²)、风温(℃)	太阳能热风干燥设备主要是由太阳能空气集热器、干燥室、热交换器三部分构成;独立干燥室易于调控,集热器集热效率高。	节约能源;缩短干燥周期;提高产品质量。
联合干燥技术设备	依据联合的干燥技术设备	干燥技术设备间互相结合、互相弥补。	干燥速度快、时间短;干后品质优;能耗低。

4 花生荚果干燥发展建议

1)联合干燥技术可以将两种及以上的干燥技术进行结合优化,实现优势互补。未来应针对花生荚果干燥的要求及产品特点,开展干燥技术的融合联用,通过多种新型干燥技术的优化和重组来实现高效、环保、保质的干燥目标,有效提升花生荚果的干燥效率及品质。

2)用于干燥玉米籽粒或颗粒状农副产品等类似的设备,只要选用批量适合的机型,通过调整干燥参数都能用于花生果的干燥。

3)进一步加大对花生荚果干燥专用设备的探索及研发,有针对性地根据花生自身的特点及品质要求确定干燥工艺,设计干燥装置,提升干燥效率和品质,实现节能降耗和绿色环保。


4)应加大资金投入、大力扶持相关的设备及技术研发创新项目,扶持花生荚果专用标准化干燥技术装备推广应用。

参考文献:

- [1] VOLLMANN J, RAJCAN I. Oil Crops[M]. Springer New York, 2010.
- [2] 秦利, 韩锁义, 刘华. 我国食用花生研究现状[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 4-7.
QIN L, HAN S Y, LIU H. Current status of edible peanut in China [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 43(11): 4-7.
- [3] 郝翠翠. 花生转录因子 AhWR11 基因的克隆与功能研究[D]. 青岛科技大学.
HAO C C. Cloning and function of the peanut transcription factor AhWR11 gene[D]. Qingdao University of Science and Technology.
- [4] 王海鸥, 陈守江, 胡志超, 等. 花生黄曲霉毒素污染与控制[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 270-273.
WANG H O, CHEN S J, HU Z C, et al. Peanut aflatoxin contamination and control[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2015, 43(1): 270-273.
- [5] 李建辉. 花生中黄曲霉毒素的影响因子及脱毒技术研究[D]. 中国农业科学院, 2009.
LI J H. Study on aflatoxin impact factor and detoxicity in peanut[D]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [6] 张国良. 基于太阳能综合利用的花生干燥系统研究[D]. 山东农业大学, 2017.
ZHANG G L. Research on the peanut drying system based on the comprehensive utilization of solar energy[D]. Shandong Agricultural University, 2017.
- [7] 王海鸥, 胡志超, 陈守江, 等. 收获时期及干燥方式对花生品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 292-300.
WANG H O, HU Z C, CHEN S J, et al. Effect of harvest period and drying method on peanut quality[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33 (22): 292-300.
- [8] WEIGLER F, MELLMANN J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particology, 2014.
- [9] 陈中玉, 高连兴. 美国花生收获机械现状与发展[J]. 农机市场, 2020(8): 57-59.
CHEN Z Y, GAO L X. Current status and development of american peanut harvest machinery[J]. Agricultural Machinery Market, 2020(8): 57-59.
- [10] 颜建春, 吴努, 胡志超, 等. 花生干燥技术概况与发展[J]. 中国农机化, 2012(2): 10-13+20.
YAN J C, WU N, HU Z C, et al. Overview and development of

- peanut drying technology[J]. China agricultural mechanization, 2012(2): 10-13+20.
- [11] 孙玉涛, 尚书旗, 王东伟, 等. 美国花生收获机械现状与技术特点分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 7-11.
SUN Y T, SHANG S Q, WANG D W, et al. Analysis of the current situation and technical characteristics of American peanut harvest machinery[J]. Agricultural mechanization Research, 2014, 36(4): 7-11.
- [12] LEWIS M A, TRABELSI S, NELSON S O. Investigating kernel moisture content at the front and back of semitrailers during peanut drying[C]//2016 ASABE Annual International Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016: 1.
- [13] LEWIS M A, TRABELSI S, NELSON S O. Using a Peanut Drying Monitoring System to Estimate Costs of Nonbeneficial Dryer Operation[C]// ASABE Annual International Meeting. 2017.
- [14] CLAUDIA A V R, OTNIEL F S, ANTONIO E DA S A. Storage peanut kernels fungal contamination and aflatoxin as affected by liming, harvest time and drying[J]. Ciência Rural, 2005, 35(2).
- [15] 吴兰荣, 陈静, 苗华荣, 等. 花生种子实用超干贮藏技术研究 I. 烘箱法干燥花生种子的探索[J]. 花生学报, 2003(S1): 195-199.
WU L R, CHEN J, MIAO H R, et al. Peanut seed exploration of dried peanut seeds by oven method[J]. Journal of Peanut, 2003 (S1): 195-199.
- [16] ARAUJO W D, GONELI A, ORLANDO R C, et al. Propriedades físicas dos frutos de amendoim durante a secagem[J]. Revista Caatinga, 2015, 28(4): 170-180.
- [17] GONELI A, ARAUJO W D, HARTMANN FILHO C P, et al. Drying kinetics of peanut kernels in thin layers[J]. Engenharia Agrícola, 2017, 37(5): 994-1003.
- [18] 刘丽, 王强, 刘红芝. 花生产后初加工技术与机械现状[J]. 农产品加工(创新版), 2011(7): 50-54.
LIU L, WANG Q, LIU H Z. Initial processing technology and mechanical status after flower production[J]. Agricultural products processing(Innovation Edition), 2011(7): 50-54.
- [19] 杨慧, 王童, 翟辰璐, 等. 我国花生干燥影响因素分析及干燥技术装备研究进展[J]. 河南农业科学, 2021, 50(2): 1-7.
YANG H, WANG T, ZHAI C L, et al. Analysis of influencing factors of peanut drying and drying equipment in China[J]. Henan Agricultural Science, 2021, 50(2): 1-7.
- [20] QU C L, WANG Z W, JIN X B, et al. A moisture content prediction model for deep bed peanut drying using support vector regression[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11).
- [21] 王仕琪. 花生干燥过程中湿热传递机理及实验研究[D]. 河南工业大学, 2020.
WANG S Q. Transmission mechanism during peanut drying[D]. Henan University of Technology, 2020.
- [22] 王殿轩, 渠琛玲, 陈亮, 等. 一种辅热烟卤效应花生抑霉干燥装置[P]. 河南省: CN211910356U, 2020-11-13.
WANG D X, QU C L, CHEN L, et al. A coheat chimney-effect peanut mildew-suppression drying device[P]. Henan Province: CN211910356U, 2020-11-13.
- [23] 王凤军. 花生干燥设备[P]. 天津: CN106931757A, 2017-07-07.
WANG F J. Peanut drying equipment[P]. Tianjin: CN106931757A, 2017-07-07.
- [24] 于蒙杰, 张学军, 牟国良, 等. 我国热风干燥技术的应用研究进展[J]. 农业科技与装备, 2013(8): 14-16.
YU M J, ZHANG X J, MOU G L, et al. Progress in application of hot wind drying technology in China[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2013(8): 14-16.
- [25] QU C L, WANG X K, WANG Z W, et al. Effect of drying temperatures on the peanut quality during hot air drying[J]. Journal of oleo science, 2020, 69(5).
- [26] SARATH K, GONELI A, FILHO C, et al. Physiological potential of peanut seeds submitted to drying and storage[J]. J Seed, 2016, 38(3): 233-240.
- [27] 林子木, 赵卉, 李玉, 等. 花生热风干燥特性及动力学模型的研究[J]. 农业科技与装备, 2020(2): 31-33.
LIN Z M, ZHAO H, LI Y, et al. Study on thermal wind drying characteristics and kinetic model of peanut[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2020(2): 31-33.
- [28] 王安建, 刘丽娜, 李顺峰. 花生热风干燥特性及动力学模型[J]. 河南农业科学, 2014, 43(8): 137-141.
WANG A J, LIU L N, LI S F. Hot air drying characteristics and kinetic model of peanut[J]. Henan Agricultural Science, 2014, 43 (8): 137-141.
- [29] MAO S W, SRZEDNICKI G, DRISCOLL R H. Modeling of drying of selected varieties of Australian peanuts[J]. Taylor & Francis Group, 2012, 30(16).
- [30] 周巾英, 罗晶, 何家林, 等. 我国花生机械化干燥生产现状与发展[J]. 江西农业学报, 2019, 31(2): 66-69.
ZHOU J Y, LUO J, HE J L, et al. Status and development of peanut mechanized drying production in China[J]. Jiangxi Agricultural Journal, 2019, 31(2): 66-69.
- [31] 张鹏. 连续立式花生干燥器的研制[D]. 江西农业大学, 2015.
ZHANG P. Development of a continuous vertical peanut dryer[D]. Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [32] ZENG S, DU Z, LV W, et al. Experimental study on the hygrothermal dynamics of peanut(*Arachis hypogaea* Linn.) in the process of superposition and variable temperature drying[J]. Drying Technology, 2021: 1-17.
- [33] 王清光, 于首平. 一种分段式花生干燥塔[P]. 山东: CN103211278A, 2013-07-24.
WANG Q G, YU S P. A segmented peanut drying tower[P]. Shandong province: CN103211278A, 2013-07-24.
- [34] 陈鹏泉, 朱文学, 王殿轩, 等. 一种滚筒型花生高效干燥装置[P]. 河南省: CN111765738A, 2020-10-13.
CHEN P X, ZHU W X, WANG D X, et al. A roller-type peanut-efficient drying device[P]. Henan Province: CN111765738A, 2020-10-13.
- [35] 王殿轩. 一种径向温风花生果干燥仓, CN207081279U[P].
WANG D X. A radial warm wind peanut fruit drying warehouse, CN207081279U[P].
- [36] 孙晓菲. 胡萝卜 CO₂ 气调热泵干燥及其 β-胡萝卜素降解研究[D]. 江苏大学, 2019.

- SUN X F. Study on Carrot CO₂ Gas Heat Regulation Pump Dry and Its β -Carrot Degradation[D]. Jiangsu University, 2019.
- [37] HAWLADER M, PERERA C O, TIAN M. Properties of modified atmosphere heat pump dried foods[J]. Journal of food engineering, 2006, 74(3): 392-401.
- [38] 赵锡和, 陈永春, 吴耀森, 等. 回热式热泵稻谷干燥机[P]. 广东: CN101769675A, 2010-07-07.
ZHAO X H, CHEN Y C, WU Y S, et al. Return heat type heat pump rice dryer[P]. Guangdong province: CN101769675A, 2010-07-07.
- [39] 王安建, 高帅平, 田广瑞, 等. 花生热泵干燥特性及动力学模型[J]. 农产品加工, 2015(9): 57-60.
WANG A J, GAO S P, TIAN G R, et al. Dry characteristics and kinetic model of peanut heat pump[J]. Agricultural products processing, 2015(9): 57-60.
- [40] 魏娟, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 塔式玉米除湿热泵连续烘干系统的模拟及应用[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 114-119.
WEI J, YANG L W, ZHANG Z T, et al. Simulation and application of continuous drying system of tower corn dehumidification heat pump[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 114-119.
- [41] VAZQUEZ G, CHENLO F, MOREIRA R, et al. Grape drying in a pilot plant with a heat pump[J]. Drying Technology, 1997, 15(3-4).
- [42] 龚丽, 刘清化, 刘军, 等. 柠檬热泵干燥工艺参数优化[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 79-83.
GONG L, LIU Q H, LIU J, et al. Lemon heat pump drying process parameters optimization[J]. Food Research and Development, 2017, 38(7): 79-83.
- [43] 刘兰, 关志强, 李敏. 罗非鱼片热泵干燥时间及品质影响因素的初步研究[J]. 食品科学, 2008(9): 307-310.
LIU L, GUAN Z Q, LI M. Preliminary study on drying time and quality influencing factors of tilapia sheet heat pump[J]. Food Science, 2008(9): 307-310.
- [44] 肖波, 刘军, 吴易磊, 等. 低盐淡水鱼整鱼及非腌制肉类的低温热泵干燥试验[J]. 现代农业装备, 2020, 41(5): 67-72.
XIAO B, LIU J, WU Y L, et al. Low-temperature heat pump drying test for low-salt fresh fish fish and non-salted meat[J]. Modern agricultural Equipment, 2020, 41(5): 67-72.
- [45] FAKHREDDI SALEHI. Recent applications of heat pump dryer for drying of fruit crops: a review[J]. International Journal of Fruit Science, 2021, 21(1).
- [46] THING C T, MEI X N, SHU H G, et al. Impacts of different drying strategies on drying characteristics, the retention of bio-active ingredient and colour changes of dried Roselle[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2018, 26(2): 303-316.
- [47] 李伟钊, 盛伟, 张振涛, 等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 278-284.
LI W Z, SHENG W, ZHANG Z T, et al. Performance test of corn drying system of heat pipe combined with multistage series heat pump[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 278-284.
- [48] 王嘉麟, 谢焕雄, 颜建春, 等. 花生荚果烘干设备研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 12-16.
- WANG J L, XIE H X, YAN J C, et al. Research status and prospect of Peanut pod drying equipment[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(1): 12-16.
- [49] ZHANG S, ZHOU L Y, LING B, et al. Dielectric properties of peanut kernels associated with microwave and radio frequency drying[J]. Biosystems Engineering, 2016.
- [50] 董铁有, 木村俊范, 吉崎繁, 等. 平铺载荷下微波干燥室的反射特性[J]. 农业机械学报, 2003(4): 71-73.
DONG T Y, MUCUN J F, JI Q F, et al. Reflective properties of the microwave drying chamber under a tiled load[J]. Agricultural Mechanical Journal, 2003(4): 71-73.
- [51] BOLDOR D, SANDERS T H, HALE S A. Control of continuous microwave drying process of peanuts using remote temperature measurement[C]//4th World Congress on Microwave & RF Applications Proceedings CD ROM, Texas: Austin, 2004.
- [52] D. BOLDOR T H, SANDERS K R, SWARTZEL, et al. A model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying[J]. Journal of Food Process Engineering, 2005, 28(1).
- [53] 陈霖. 基于控温的花生微波干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 267-271.
CHEN L. A temperature-controlled peanut microwave drying process[J]. Agricultural Engineering Journal, 2011, 27(S2): 267-271.
- [54] 韩旭, 董京磊, 官俊杰, 等. 果蔬干燥技术的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(9): 37-40.
HAN X, DONG J L, GONG J J, et al. Progress in fruit and vegetable drying techniques[J]. Chinese Food and Nutrition, 2020, 26(9): 37-40.
- [55] 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 Y, LV W Q, LI S J, et al. Progress in microwave drying technology and equipment of agricultural products[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(3): 56-61.
- [56] 闫一野. 普通真空干燥设备综述[J]. 干燥技术与设备, 2011(2): 57-63.
YAN Y Y. Review of ordinary vacuum drying equipment[J]. Dry technology and equipment, 2011(2): 57-63.
- [57] 武洪博, 陈君若. 基于水势理论的花生真空干燥特性分析[J]. 机械制造, 2016, 54(6): 38-40.
WU H B, CHEN J R. Analysis of vacuum drying properties of peanut based on water potential theory[J]. Mechanical Manufacturing, 2016, 54(6): 38-40.
- [58] 武洪博. 球形生物种子真空干燥工艺特性研究[D]. 昆明理工大学, 2016.
WU H B. Study on the vacuum drying process characteristics of spherical biological seeds[D]. Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [59] 徐成海, 张志军, 张世伟, 等. 塔型连续式真空干燥设备结构的探讨[J]. 干燥技术与设备, 2007: 246-249.
XU C H, ZHANG Z J, ZHANG S W, et al. Discussion on the structure of tower-type continuous vacuum drying equipment[J].

- Dry technology and equipment, 2007: 246-249.
- [60] 徐成海, 张志军, 张世伟, 等. 塔形连续式真空干燥设备节能方向的分析[J]. 化工机械, 2009, 36(3): 185-189.
 XU C H, ZHANG Z J, ZHANG S W, et al. Analysis of energy saving direction of tower continuous vacuum drying equipment[J]. Chemical Machinery, 2009, 36(3): 185-189.
- [61] 何翔, 王军. 低温真空连续干燥技术及其塔形设备研制初步探讨[J]. 干燥技术与设备, 2006(3): 158-161.
 HE X, WANG J. Preliminary study of low-temperature vacuum continuous drying technology and its tower equipment[J]. Dry technology and equipment, 2006(3): 158-161.
- [62] MENNOUCHE D, BOUCHEKIMA B, ZIGHMI S, et al. An experimental study on the drying of peanuts using indirect solar dryer[J]. Springer International Publishing, 2015.
- [63] 张国良. 基于太阳能综合利用的花生干燥系统研究[D]. 山东农业大学, 2017.
 ZHANG G L. Research on the peanut drying system based on the comprehensive utilization of solar energy[D]. Shandong Agricultural University, 2017.
- [64] 杨柳, 王超, 张国良, 等. 基于TRNSYS的太阳能花生干燥装置集热系统研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(9): 59-64+80.
 YANG L, WANG C, ZHANG G L, et al. Study on heat gathering system of solar peanut drying device based on TRNSYS[J]. China Agricultural Machinery Chemical News, 2017, 38(9): 59-64+80.
- [65] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 114-124.
 ZHAO D D, CHEN D, PENG Y, et al. Dynamics model and quality analysis of Chinese wolfberry hot wind drying process [J]. Chinese Journal of Food, 2018, 18(3): 114-124.
- [66] PAK M, WITHU C, TOUCHPONG C. Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple[J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(4).
- [67] BAI J W, XIAO H W, MA H L, et al. Artificial neural network modeling of drying kinetics and color changes of ginkgo biloba seeds during microwave drying process[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 8.
- [68] 周韵, 宋春芳, 崔政伟. 热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 382-386.
 ZHOU Y, SONG C F, CUI Z W. Hot-wind microwave-coupled dry carrot slice process[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 382-386.
- [69] 王招招, 路风银, 朱广成, 等. 花生果微波-热风耦合干燥特性及能耗分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 140-146.
 WANG Z Z, LU F Y, ZHU G C, et al. Dry characteristics of peanut fruit microwave-heat wind coupling and energy consumption analysis[J]. Chinese Oil Crop Journal, 2020, 42(1): 140-146.
- [70] 王招招, 杨慧, 韩俊豪, 等. 花生果微波-热风耦合干燥实验研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 155-164.
 WANG Z Z, YANG H, HAN J H, et al. Study on microwave-heat wind coupling drying[J]. China Grain and Oil News, 2021, 36(1): 155-164.
- [71] 凌铮铮, 任广跃, 段续, 等. 间歇微波—热风耦合干燥花生工艺优化及品质研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 183-189+227.
 LING Z Z, REN G Y, DUAN X, et al. Study on process optimization and quality of intermittent microwave-hot wind coupled dry peanut[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 183-189+227.
- [72] 张璧光. 太阳能-热泵联合干燥木材的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007(8): 870-873.
 ZHANG B G. Experimental study on solar-heat pump combined dry wood[J]. Solar Energy Journal, 2007(8): 870-873.
- [73] 纵伟, 陈怡平. 不同干燥方法对花生蛋白功能特性的影响[J]. 食品工程, 2007(3): 48-50.
 ZONG W, CHEN Y P. Effect of different drying methods on the functional properties of peanut protein[J]. Food Engineering, 2007(3): 48-50.
- [74] 王童, 杨慧, 朱广成, 等. 热风、微波及其联合干燥对花生营养特性及感官品质的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9): 2102-2110.
 WANG T, YANG H, ZHU G C, et al. Effects of hot wind, microwave and its combined drying on the nutritional properties and sensory quality of peanut[J]. Nuclear Agriculture, 2021, 35(9): 2102-2110.
- [75] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式对新鲜花生营养成分、理化特性及能耗的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11 [2021-10-15]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028871>.
 ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Effect of different drying methods on nutrients, physical and chemical characteristics and energy consumption of fresh peanuts[J/OL]. Food and fermentation industry: 1-11 [2021-10-15]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028871>. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。