

农副产品干燥及其联合技术研究进展

孙红霞, 孙静儒, 朱彩平*

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 西安 710119)

摘要: 随着时代的进步和人民生活水平的逐步提高, 各种农副产品已基本实现工业化深加工, 农副产品干燥技术是其深加工过程中必不可少的关键环节, 其发展及应用受到越来越多的科研工作者的关注。本文首先介绍了几种国内外常用的干燥技术(热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、喷雾干燥), 然后重点论述了过热蒸汽干燥、中短波红外干燥、太阳能干燥、热泵干燥这 4 种新型干燥技术的优缺点及其联合应用技术, 并对农副产品干燥技术未来的发展方向进行了展望。

关键词: 食品干燥; 联合干燥; 技术对比

Research progress on drying and their combined technologies of agricultural and by-products

SUN Hong-Xia, SUN Jing-Ru, ZHU Cai-Ping*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

ABSTRACT: With the progress of the times and the gradual improvement of people's living standards, various agricultural and sideline products have basically achieved industrialized deep processing. The drying technology of agricultural and by-products is an indispensable key link in the deep processing process, and its development and application attract more and more researchers' attention. This paper firstly introduced several commonly used drying technologies at home and abroad (hot air drying, vacuum freeze drying, microwave drying and spray drying), and then focused on the 4 new types of drying: superheated steam drying, medium and short wave infrared drying, solar drying and heat pump drying. The advantages and disadvantages of the technologies and their combined application technologies, and the future development directions of the agricultural by-products drying technologies were prospected.

KEY WORDS: food drying; combined drying; technical comparison

1 引言

我国是农产品生产大国, 农副产品种类多、产量大, 预计到 2020 年我国仅蔬菜种植面积将达到 2.35 亿亩, 产量 5.895 亿吨, 位居世界第一。新鲜农产品储存期短, 易变质且难保存, 大多数需要进行脱水干燥。干燥是一种去除物料中

大部分水分, 尽可能地保存营养物质, 保持原有色泽、防止其霉变褐变的一种农产品处理环节, 目的是为了延长产品储存期, 减少运输成本。虽然我国农副产品干燥加工产业已经实现工业化生产, 但相比于干燥技术较为发达的西欧和美国, 还存在干燥加工比例较低、能源消耗大、效率低等缺点。因此, 我国急需提升农副产品干燥技术, 提高其产业化应用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301598)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201803086)、大学生勤助科研项目(KY2018ZD006)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31301598), the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (GK201803086), and the Service Help Scientific Research (KY2018ZD006)

***通讯作者:** 朱彩平, 副教授, 主要研究方向为农副产品加工及利用。E-mail: zcaiping@snnu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHU Cai-Ping, Associate Professor, College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China. E-mail: zcaiping@snnu.edu.cn

本文在介绍常用农副产品干燥技术及新型农副产品干燥技术的原理、特点及应用前景的基础上, 对各种不同的农副产品联合干燥技术进行了对比, 分析了各种联合干燥方式的优缺点及其适用的农副产品, 为延长农副产品保质期、提高产品质量提供参考。

2 常用农副产品干燥技术

2.1 热风干燥技术

热风干燥技术热效率高, 气流式干燥器操作简单易调控, 是最常用的干燥方式之一^[1]。主要应用于苹果、猕猴桃、红枣、香菇等果蔬的干燥。其工作原理是, 热风干燥过程通过鼓风装置向干燥箱或者干燥室内吹入热风, 进而使空气流动速度加快使水分蒸发^[2]。但热风干燥时间较长、高压通风机动力消耗大、且设备占地面积大, 在小型加工厂中不利于生产, 且干燥后对物料的色泽改变较大, 影响其感官品质。刘艳等^[3]利用热风干燥大果山楂片并研究其干燥特性及动力学模型, 结果表明山楂片厚度和物料量的增加, 都会影响热风干燥速率的下降。

2.2 真空冷冻干燥

真空冷冻干燥是调节温度将物料中的水分凝结成小冰晶, 然后在真空条件下直接将水分从固态升华为气态水蒸气, 再利用低温冷阱将水蒸气冷凝, 从而达到干燥目的^[4]。真空冷冻干燥对于含水量较高的物料干燥效果较好, 且具有良好的品质和色泽, 但成本高、耗能大、时间长等。联合干燥可有效解决成本及时间问题, 目前常用于果蔬、水产品、调味品等的干燥^[5]。张玉斌等^[6]利用真空冷冻技术干燥浓缩牦牛骨汤, 得出该干燥方式能够最大限度保留物料原有挥发性物质, 较好地保持物料的色泽、质构, 但存在干燥能耗较高、产品附加值增加等缺点。2014 年, 叶晓梦^[7]利用微波-真空冷冻联合干燥研究铁棍山药的最佳干燥工艺条件, 结果表明联合干燥条件下铁棍山药的品质、色泽及营养成分保留最佳。

2.3 微波干燥

微波干燥的原理是用微波激起物体内部水分子的振荡, 造成分子间剧烈的内摩擦, 从而使物体发热, 水分挥发^[8]。微波干燥物料水分散失快, 效率高, 加热温度、功率均可调节, 自动化程度高, 但干燥成本较高, 目前主要应用在化工、木材、造纸、食品等领域^[9]。张黎骅等^[10]利用微波间歇干燥研究鲜切高山野山药片, 其研究表明微波间歇干燥可以使山药中水分分布更均匀, 相比于其他干燥方式, 其干燥品质和速率均有所提高。

3 新型农副产品干燥技术

3.1 过热蒸汽干燥

过热蒸汽干燥是一种以过热蒸汽为干燥介质, 直接

与被干燥物料接触而除去水分的新型干燥方式, 过去主要被用于食品表面瞬时杀菌, 现在也用来进行食品干燥^[11]。过热蒸汽干燥属于内部扩散控制, 只适用于大型不可切分的或干物质含量高的物料, 且干燥过程中温度不可过高, 容易造成物料表面水分蒸发而内部水分还在的情况出现, 导致产品表面产生硬壳。

3.1.1 过热蒸汽干燥的原理及特点

过热蒸汽是对饱和蒸汽继续加热, 在常压下其温度高于沸点的高温无色透明水蒸气。在食品干燥过程中, 当过热蒸汽温度高于逆转点温度时, 过热蒸汽蒸发的速率大于干空气蒸发的速率, 食品干燥效应明显, 干燥产品具有多孔性结构, 较好保持食品原有的有效成分和色泽^[12]。过热蒸汽干燥的特点如下: (1) 传热阻力小、效率高; (2) 节能无污染; (3) 干燥质量高; (4) 操作安全^[13]。

3.1.2 过热蒸汽干燥的应用及其联合干燥

如今过热蒸汽已经广泛应用到各种不同物料的干燥中, 为了使其更高效、高质量工作, 各个科研团队在实践过程中研发出不同的过热蒸汽干燥装置, 极大的提高优化普通过热蒸汽干燥技术^[14]。马怡光等^[15]研究了食品低压过热蒸汽干燥技术, 认为过热蒸汽干燥应用于食品等热敏性物料, 其显著的特点是能实现无氧或少氧的干燥环境, 干燥过程产品表面不会出现硬壳或结皮的现象。

目前, 过热蒸汽流化床干燥(superheated steam fluidized bed drying, SSFBD)结合了 2 种先进干燥技术, 具有节能、环保、高效率和高产品质量的优点, 在食品、农产品、生物医药、城市污泥处理和化工等领域应用较为广泛且均具有广阔的应用前景。Xiao 等^[16]研究过热蒸汽流化床干燥油菜籽过程的数值模拟, 通过计算机数值模拟揭示了操作压力对超高温蒸汽流化床干燥动力学的影响。一般来说, 高操作压力将大大提高过热蒸汽的饱和温度降低过热度 and 干燥速度, 但同时原材料要具有良好的品质来承受干燥过程中的过高温。

3.1.3 过热蒸汽干燥前景

相比于传统的干燥方式而言, 过热蒸汽干燥的优点比较明显, 尤其是在热敏性和粉末状的物料生产中有着极大的干燥优势^[17]。在以后的工业生产中可以替代一部分的传统干燥方式进行大面积的工业化生产。同时过热蒸汽干燥在完善自身技术与设备的同时也可与热风、微波、真空冷冻等技术相结合, 开发新技术, 扩大优点、缩小缺点, 向更深更远的方向发展。

3.2 中短波红外干燥

红外根据波长(0.75~100 μm)可分为短波(0.75~2 μm)、中波(2~4 μm)和长波(4~100 μm)^[18]。中短波红外干燥是使用波长为(0.75~4 μm)的红外射线, 其特点是辐射频率大、能量高、穿透力强, 可以使分子间发生不同能级的跃迁, 因此能有效地加快干燥速率、减少营养物质的损失并获得更高质量

的干燥产品,目前多用于水果、蔬菜、谷物和中药的干燥。

3.2.1 中短波红外干燥的原理及特点

中短波红外干燥是利用红外线作为热源直接辐射到物料表面引起食品分子、原子的振动,将电能转变为热能,使物料表面温度升高水分蒸发从而起到干燥的效果。中短波红外干燥的特点如下:(1)干燥速率快、色泽好;(2)高效灭酶;(3)节能无污染^[19]。

3.2.2 中短波红外干燥的应用及其联合干燥

中短波红外干燥是近年来果蔬干燥中的一项新兴的食品加工技术,大幅提升了果蔬的干燥速度、干燥品质及其货架期,为工业化生产增加了经济效益。这种新型干燥技术与传统干燥方法相比有更大的优势,且已成功应用于胡萝卜、香菇、洋葱和猕猴桃等水果和蔬菜上的原料干燥^[20]。Jian 等^[21]在中短波红外干燥对有无渗透脱水的猕猴桃片的品质与特性影响的研究中表明,无论是否用渗透进行预处理,红外线干燥过程主要发生在降速阶段,且可减少其颜色变化并增加抗坏血酸和叶绿素的保留率。

目前在对不同果蔬干燥方式的研究中,常将中短波红外干燥同热风干燥或超声波干燥联合,以达到果蔬最佳干燥工艺。Chen 等^[22]研究不同温度下红枣切片经热风-中短波红外联合干燥后产品的品质特性,研究表明联合干燥的红枣品质要远远优于单一干燥,且干燥时间为热风的 33%~83%;另有研究表明,用超声波-中短波红外联合干燥红枣至 40%干基含水量,所需时间远短于热风和中短波红外干燥^[22]。

3.2.3 中短波红外干燥前景

中短波红外干燥有干燥比较均匀、干制品质量好、设备结构简单、体积较小且成本低等优点,目前在食品行业中主要用于果蔬和粮食加工。中短波红外干燥虽使用较广但与传统方式联合干燥应用较少。大量研究表明中短波红外联合干燥要比单一的干燥方式更高效、更节时、更节能,联合干燥技术将会有巨大的潜在市场,值得继续开发。

3.3 太阳能干燥

直接或间接利用太阳能对农产品进行干燥,是我国古代用于农作物保存的有效方法。但在开放空间自然晾晒时,农作物直接暴露在阳光下,既容易受到污染和虫害的侵染,又会被鸟类和野兽破坏而造成损失。现代太阳能干燥设备占地面积小,可使干燥产品达到最佳质量、颜色和味道,成本几乎为零,常用于农作物、果蔬、鱼类等的干燥^[23]。

3.3.1 太阳能干燥的原理及特点

太阳能干燥的基本原理是利用热能,使固体物料中水分汽化,并扩散到空气中,是一个传热、传质的过程。太阳能干燥的特点如下:(1)节能省电;(2)环保无污染;(3)可促进乡村农副产品质量^[24]。

3.3.2 太阳能干燥的应用及其联合干燥

早在二十世纪七八十年代,欧美一些发达国家就开始研发太阳能干燥装置,用在果蔬等的干燥上。泰国和马

来西亚等热带多雨的国家在全年或非收获季节用来干燥辣椒、咖啡豆和虾,这样能够很好解决全年农作物的干燥问题^[23]。在我国,太阳能干燥主要应用在农副产品和某些物料的预干上。除了开展谷物类、果蔬类以及木材的干燥实验和应用研究外,还进行了中草药、茶叶、鲜花、植物叶片、食品(如鱼、腊肠)等的干燥^[24]。

目前大量实验研究表明,太阳能与热泵联合干燥效果明显。郭胜兰等^[25]研究小型太阳能热泵联合干燥系统,并对比了热泵单一干燥和联合干燥下的制热系数,结果表明联合干燥可以大幅提高热泵干燥的制热系数;李建军^[26]研究了太阳能红外联合干燥葡萄,并论证其可以用来干燥中草药的可能性;姚思远^[27]研究了混联式太阳能干燥设备,解决了温度波动大的问题,可以高效率低成本干燥枸杞。

3.3.3 太阳能干燥前景

太阳能干燥虽有众多优点但也存在局限,影响其大面积推广的原因有:太阳能属于间接性能源,供能不连续、不稳定,不适合用来作长期干燥装备^[28]。太阳能干燥虽然在推广上存在诸多问题,但由于全球环境污染严重问题,太阳能作为一种新型能源有着良好的发展前景。

3.4 热泵干燥

随着煤炭、石油价格的上升,干燥成本在逐渐上升,人们开始寻找可替代传统干燥方法的低能源干燥。热泵干燥对谷物、蔬菜等进行脱水效果良好,且运行成本低于燃煤干燥而耗能仅是燃煤的 50%。根据市场的需求,许多供应商将热泵热水器改良加工为热泵干燥装置。

3.4.1 热泵干燥的原理及特点

热泵干燥系统由制冷剂回路和干燥介质回路 2 个子系统组成。热泵系统为内循环系统,其工作时热泵压缩机做功并利用蒸发器回收低品位热能,在冷凝器中使之升为高品位热能。由冷凝器出来的热空气再进入干燥室,对湿物料进行干燥^[29]。热泵干燥的特点主要有:(1)可调节范围产品质高;(2)可循环利用无污染;(3)高效节能^[30]。

3.4.2 热泵干燥的应用及其联合干燥

热泵干燥目前已广泛应用到各类农产品的加工中,包括谷物、种子、茶叶、脱水蔬菜、鱼类、药材等的干燥。李丽等^[31]以切片厚度和干燥温度为因素研究新鲜山药的热泵干燥特性及曲线模型,发现相比于热风干燥,采用热泵干燥方式山药具有较好的复水性,色泽呈乳白色,感官品质等均良好。Hii 等^[32]对可可豆进行了热泵干燥研究,发现热泵干燥有利于物料内热敏性多酚类物质的保留。

目前与热泵干燥联合较多的是太阳能热泵干燥和超声波热泵干燥。利用超声波对干燥物料进行预处理,可在不加热条件下降低固体水分含量,加速干燥速率降低能源消耗。朱宗升^[33]研究了以闭式热泵干燥系统为基础增加超声波装置建立超声波-热泵联合干燥系统,并在不同温度、超声波频率、超声波功率对青豆种子进行联合干燥。得出

超声波热泵联合干燥可加快干燥速率, 且随着超声波频率和功率的增大, 干燥速率也随着增加。

3.4.3 热泵干燥前景

热泵干燥有着高效节能环保的优点且类似于低温的热风干燥, 温度在 40~80 °C 之间, 对于热敏性物料来说可起到良好的干燥效果。但对于一些耐高温的物料来说, 干燥速率低下不能达到其最佳的干燥工艺, 因此热泵与其他干燥方式的联合干燥及高温热泵干燥是今后的一种发展趋势。当今世界, 热泵干燥技术正朝着高温干燥、自动控制程度高、兼顾提高产品质量和能耗低的方向发展, 2 者统一起来的热泵干燥技术将给干燥行业带来一场重大的技术革命^[34]。

3.5 气体射流冲击干燥

气体射流冲击技术是近几年才引入中国的一种干燥技术, 目前仅在果蔬、农产品干燥中应用效果良好, 如: 核桃、苦瓜片、猕猴桃片等物料。

3.5.1 气体射流冲击干燥的原理及特点

气体射流冲击是将高速的气体利用圆形或扁口的喷嘴喷出, 使得气流与物料表面产生非常薄的边界层, 从而提高了传热效率和热质交换速率, 缩短了干燥时间^[35]。与传统的干燥方式相比, 气体射流冲击干燥有以下 2 个优点: (1) 传热系数高; (2) 效率高且干燥均匀^[36]。

3.5.2 气体射流冲击干燥的应用

我国对气体射流冲击干燥的研究, 目前主要集中在果蔬及农产品等方面。黄迪等^[37]通过对气体射流冲击干燥猕猴桃片的复水动力学特性及数学模型的研究, 得出干燥后的猕猴桃片复水性受干燥风温较大但整体品质较好。薛珊等^[35]利用气体射流冲击干燥苦瓜片, 研究结果表明其对提高苦瓜片的干燥品质、缩短干燥时间有一定的积极效果。

3.5.3 气体射流冲击干燥的前景

气体射流冲击干燥具有传热效率高、干燥速率快的优

点, 但因其干燥过程中温度较高且不好控制, 不太适合大型不可切分物料的干燥, 容易造成干燥不均匀形成表面硬壳。所以目前气流射流冲击干燥在我国干燥工业中应用不太广泛, 其工艺需要进一步优化, 未来的发展空间较大。

4 农副产品联合干燥技术对比

综合现阶段的研究, 对热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、过热蒸汽干燥、中短波红外干燥、太阳能干燥、热泵干燥共 7 种干燥方式的联合干燥技术进行对比, 得到不同干燥方式优缺点及适合加工的产品如表 1 所示。从表 1 可以看出, 不同联合干燥方式, 适合加工的产品均有所差别, 与其产品干燥前的组成成分密切相关。食品的干燥主要分为两个控制: 表面汽化控制和内部扩散控制。可切成薄片或丝或颗粒状, 且含糖量较低的这类物料干燥, 属于表面汽化控制类型; 大型不可切分且含糖量较高的物料干燥, 属于内部扩散控制类型, 此种物料干燥时不可提高温度, 否则容易造成外部水分迅速蒸发, 内部水分还在的情况, 导致表面硬壳的形成。因此, 有必要根据产品自身的特点来选择合适的干燥方式。

5 结论与展望

相比单一干燥方式, 联合干燥方式不仅可以发挥更好的干燥效果, 还能相互弥补各个技术间的不足, 根据各种农副产品的特点, 联合各种不同的干燥方式以延长农产品的储存期、提高产品质量势在必行。今后农副产品干燥以节能、增效为主要发展趋势, 同时还应根据消费者对产品品质的需求, 大力加强联合干燥设备的研究。此外, 在满足消费者对产品感官品质需求的同时, 还应有效控制干燥过程中产品营养成分的损失, 使得干燥产品品质最优化。

表 1 不同联合干燥技术对比结果
Table 1 Comparison of different combined drying technologies

联合干燥类型	优点	缺点	适合加工的产品
热风-真空冷冻干燥	低成本、产量高、自动化程度高、操作简单	脱水慢、耗时长、成品品质差	红枣、胡萝卜、南瓜、杏鲍菇等蔬菜以及腌菜类 ^[38-40]
热风-中短波红外干燥	色泽好、耗时短	品质稍差、成本高	蔬菜类、水果类 ^[19,20]
热风-微波干燥	可连续化生产、有杀菌防腐保鲜作用、热能	干燥不均匀、成本高	中草药、果蔬类、鱼制品 ^[41,42]
微波-真空冷冻干燥	干燥时间短且有明显的杀菌效果、防腐保鲜、耗能小、可连续生产	产品色泽与感官品质差、成本较高、干燥终点判断困难	木耳、银耳、铁棍山药等蔬菜类以及部分水果 ^[7]
微波-过热蒸汽干燥	缩短干燥时间、提高速率及品质	耗能大、成本高	蔬菜类 ^[13]
太阳能-红外干燥	节能环保、快速高效、高品质	受天气影响较大、蓄能条件差	水果、中草药及部分农副产品 ^[24]
太阳能-热泵干燥	可大幅提高热泵制热系数、绿色环保、高效节能	受天气影响较大、装置占地面积较大	谷物、果蔬、中草药等 ^[24]

参考文献

- [1] 姜正, 刘清, 徐恒, 等. 金银花热风干燥品质变化及工艺优化[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 61-68.
Lou Z, Liu Q, Xu H, *et al.* Quality variation and process optimization of hot air drying of honeysuckle [J]. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed), 2018, 38(1): 61-68.
- [2] 李阳. 果蔬热风真空组合干燥实验研究及装置设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
Li Y. Experimental study and equipment design of hot-air vacuum combination drying for fruits and vegetables [D]. Xi'an: Shanxi University of Science Technology, 2017.
- [3] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 82-87.
Liu Y, Duan ZH, Tang XX, *et al.* Hot-air drying characteristics and kinetics model of *Malusdomeri* (Bois) Chev. slices [J]. Food Ind, 2017, 38(3): 82-87.
- [4] 金洋, 张洪超, 薛张芝, 等. 不同干燥方法对乌贼品质及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 189-195.
Jin Y, Zhang HC, Xue ZZ, *et al.* Effects of drying methods on quality and microstructure of Cuttlefish [J]. Food Sci, 2017, 38(15): 189-195.
- [5] 尹秀莲, 张学娟, 万苗苗, 等. 真空冷冻干燥法制备草莓粉工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(5): 58-62.
Yin XL, Zhang XJ, Wan MM, *et al.* Study on vacuum freeze drying technology of strawberry powder [J]. Food Ferment Technol, 2017, 53(5): 58-62.
- [6] 张玉斌, 余群力, 聂志刚, 等. 浓缩牦牛骨汤真空冷冻干燥工艺实验研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(1): 259-263, 362.
Zhang YB, Yu QL, Nie ZG, *et al.* Experimental study on technology of vacuum freeze-drying of concentrated soup of yak bone [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(1): 259-263, 362.
- [7] 叶晓梦. 铁棍山药冻干—微波真空联合干燥工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
Ye XM. Research on freeze-drying and microwave vacuum combined drying technology of iron stick yam [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014.
- [8] 李里特. 微波在食品加工中应用的原理和特点[J]. 食品工业科技, 1991, (6): 33-34.
Li LT. Principles and characteristics of microwave application in food processing [J]. Sci Technol Food Ind, 1991, (6): 33-34.
- [9] 唐小闲, 段振华, 刘艳, 等. 马蹄湿淀粉微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(5): 15-21.
Tang XX, Duan ZH, Liu Y, *et al.* Microwave batch drying characteristics and kinetics of water chestnut starch [J]. Food Res Dev, 2017, 38(5): 15-21.
- [10] 张黎骅, 武莉峰, 党鑫凯, 等. 鲜切高山野山药片微波间歇干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 39-44, 92.
Zhang LY, Wu LF, Dang XK, *et al.* Drying characteristics of intermittent microwave heated fresh-cut high mountain yam slice [J]. Food Mach, 2017, 33(1): 39-44, 92.
- [11] 乔柱, 关二旗, 卞科. 玉米过热蒸汽干燥特性及干燥模型构建[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 5-11.
Qiao Z, Guan EQ, Bian K. Characteristics of maize in superheated steam drying and model construction [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2017, 38(1): 5-11.
- [12] 尹莉丽, 王庭欣, 张良, 等. 过热蒸汽加工红烧肉的工艺研究[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 122-128.
Yin LL, Wang TX, Zhang L, *et al.* Superheated steam processing of braised pork cooking [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(10): 122-128.
- [13] 黄小丽. 稻谷过热蒸汽干燥过程中的力学及干燥动力学特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
Huang XL. Mechanical characteristics and drying kinetics during superheated steam drying of rice kernel [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [14] Rachna S, Prabhat KN, Barjinder PK. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods [J]. LWT-Food Sci Technol, 2018, 92: 548-555.
- [15] 马怡光, 张绪坤, 余蓉, 等. 食品低压过热蒸汽干燥技术[J]. 食品科技, 2012, 37(11): 94-97.
Ma YG, Zhang XK, Yu R, *et al.* Food low-pressure superheated steam drying technology [J]. Food Sci Technol, 2012, 37(11): 94-97.
- [16] Xiao Z, Zhang F, Xu L, *et al.* Numerical simulation on superheated steam fluidized bed drying at different operating pressures [J]. Int J Food Eng, 2017, 13(10): 1-10.
- [17] Rachna S, Prabhat KN, Barjinder PK. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling [J]. Innov Food Sci Emerg, 2016, 34: 285-301.
- [18] 王雪媛, 高琨, 陈芹芹, 等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 275-281.
Wang XY, Gao K, Chen QQ, *et al.* Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying [J]. J Agric Eng, 2015, 31(12): 275-281.
- [19] 郭玲玲. 香菇中短波红外干燥工艺及应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
Guo LL. Research on technology and application of Medium and short wave infrared radiation drying for shiitake mushrooms [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [20] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰. 香菇中短波红外干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 44-51.
Guo LL, Zhou LY, Bi JF. Optimization of medium- and short-wave infrared radiation drying process for shiitake mushroom [J]. Food Sci, 2016, 37(6): 44-51.
- [21] Jian L, Chen Q, Bi J, *et al.* Drying characteristics and quality of kiwifruit slices with/without osmotic dehydration under short- and medium-wave infrared radiation drying [J]. Int J Food Eng, 2017, 13(8): 1-15.
- [22] Chen Q, Bi J, Wu X, *et al.* Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphusjujuba*, Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 64(2): 759-766.
- [23] Singh P, Shrivastava V, Kumar A. Recent developments in greenhouse solar drying: A review [J]. Renew Sust Energ Rev, 2018, 82: 3250-3262.
- [24] 明廷玉, 李保国. 太阳能干燥技术的研究及其应用[J]. 中外能源, 2015, 20(8): 34-40.
Ming TY, Li BG. Solar drying technologies and applications [J]. Sino-Foreign Energy, 2015, 20(8): 34-40.

- [25] 郭胜兰, 关志强, 李敏, 等. 小型太阳能热泵联合干燥系统的设计与分析[J]. 制冷, 2009, 28(4): 15-19.
Guo SL, Guan ZQ, Li M, *et al.* Design and analysis on small solar energy-heat pump combined drying apparatus [J]. Refrigeration, 2009, 28(4): 15-19.
- [26] 李建军. 太阳能-红外联合干燥葡萄的探讨[J]. 农学学报, 2014, 4(3): 68-71.
Li JJ. Solar-infrared investigate of joint dried grapes [J]. J Agric, 2014, 4(3): 68-71.
- [27] 姚思远. 混联式太阳能干燥设备优化及枸杞干燥工艺研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
Yao SY. The optimization of hybrid solar drying equipment and research on drying process of Chinese wolfberry [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014.
- [28] Rabha DK, Muthukumar P, Somayaji C. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger [J]. Renew Energy, 2017, 105: 764-773.
- [29] 赵海波, 杨昭, 朱宗升. 热泵间歇干燥最优方式研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 35-41.
Zhao HB, Yang Z, Zhu ZS. Researches on the optimal process of heat pump intermittent drying [J]. J Refrig, 2014, 35(6): 35-41.
- [30] 吴佰林, 薛勇, 李兆杰, 等. 温度模式对鲑鱼热泵干燥品质及动力学特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 86-92, 99.
Wu BL, Xue Y, Li ZJ, *et al.* Effect of temperature mode on quality and kinetic characteristics of *scomberomorus niphonius* of heat pump drying [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(4): 86-92, 99.
- [31] 李丽, 孙健, 盛金凤, 等. 山药热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 212-217.
Li L, Sun J, Sheng JF, *et al.* Heat pump drying characteristics and mathematical modeling of Chinese yam [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(10): 212-217.
- [32] Hii CL, Law CL, Suzannah S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying [J]. J Food Eng, 2012, 108(2): 276-282.
- [33] 朱宗升. 超声波-热泵联合干燥热力学分析及青豆种子干燥特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Zhu ZS. Thermodynamic analysis of ultrasonic-heat pump combined drying and study on drying characteristics of green bean seeds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [34] 陈东, 郝建华, 谢继红, 等. 低温热泵干燥装置的技术方案分析[J]. 化工装备技术, 2012, 33(4): 1-3.
Chen D, Hao JH, Xie JH, *et al.* Analysis on technical scheme of low-temperature heat pump drying device [J]. Chem Equip Technol, 2012, 33(4): 1-3.
- [35] 薛珊, 赵武奇, 高贵田. 苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 743-754.
Xue S, Zhao WQ, Gao GT. Drying characteristics and model of bitter melon slice in air-impingement jet dryer [J]. Sci Agric Sin, 2017, 50(4): 743-754.
- [36] 于贤龙, 高振江, 代建武, 等. 苜蓿气体射流冲击联合常温通风干燥装备设计及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 293-300.
Yu XL, Gao ZJ, Dai JW, *et al.* Design and test of alfalfa gas jet impingement combined with room temperature ventilation and drying equipment [J]. J Agric Eng, 2017, 33(15): 293-300.
- [37] 黄迪, 李文峰, 杨兴斌, 等. 气体射流冲击干燥猕猴桃片的复水动力学特性及数学模型[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 86-92.
Huang D, Li WF, Yang XB, *et al.* Rehydration characteristics and math model for different air-impingement jet dried kiwifruit slices [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(5): 86-92.
- [38] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 27(4): 25-30.
Tang QS, Liu XM, Chi JW, *et al.* Effects of different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Sci, 2016, 37(4): 25-30.
- [39] 高飞. 微波、远红外、真空冷冻及其与热风联合干燥对红枣品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.
Gao F. The research of hot air combined microwave, far-infrared, vacuum freeze drying effect on the quality of Chinese date [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [40] 孙翠, 王钰, 沈小瑞, 等. 杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 189-193.
Sun C, Wang Y, Shen XR, *et al.* Optimization of hot air vacuum freeze drying for *Eurotuseryngii* [J]. Food Mach, 2017, 33(2): 189-193.
- [41] 王鹤, 慕松, 李天聪, 等. 基于响应面法的枸杞热风微波联合间歇干燥工艺探究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(2): 134-140, 109.
Wang H, Mu S, Li TC, *et al.* Study on the microwave combined batch drying process of *lyceum barbarum* based on response surface method [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(2): 134-140, 109.
- [42] 李艳, 郇延军, 李培红, 等. 膨化鱼片的热风-微波干燥工艺研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(1): 225-228.
Li Y, Huan YJ, Li PH, *et al.* Study on hot air-microwave drying technology of puffing fillets [J]. Sci Technol Food Ind, 2011, 32(1): 225-228.

(责任编辑: 苏笑芳)

作者简介



孙红霞, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 1352523445@qq.com



朱彩平, 副教授, 主要研究方向为农副产品加工及利用。

E-mail: zcaiping@snnu.edu.cn