

果蔬冷冻干燥节能新技术研究进展

Research progress on the new freeze-drying technology of fruits and vegetables

王新珂¹ 杨锡洪^{1,2} 吴帆¹ 谢静雯¹

WANG Xin-ke¹ YANG Xi-hong^{1,2} WU Fan¹ XIE Jing-wen¹

郁东兴^{3,4} 解万翠^{1,2,3,4}

YU Dong-xing^{3,4} XIE Wan-cui^{1,2,3,4}

(1. 青岛科技大学海洋科学与生物工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 山东省生物化学工程重点实验室, 山东 青岛 266042; 3. 青岛智科检验检测有限公司, 山东 青岛 266002; 4. 尚好科技有限公司, 山东 青岛 266002)

(1. College of Marine Science and Biological Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266042, China; 2. Key Laboratory for Biochemical Engineering of Shandong Province, Qingdao, Shandong 266042, China; 3. Qingdao Zhike Inspection and Testing Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266002, China; 4. Shanghao Science and Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266002, China)

摘要: 分析比较了不同干燥技术对产品品质的影响, 指出冻干产品的品质优势及产业化障碍; 总结蔬薄层干燥动力学模型的应用现状, 探讨常用模型特点; 阐明冷冻前处理、控制冷冻速率和调节冰晶成核等预冻处理的提质降耗作用; 重点探讨联合干燥技术在缩短干燥时间、改善品质、节能降耗等方面的积极作用, 指出微波—冷冻联合干燥技术的产业化前景; 并对果蔬冷冻干燥技术的发展方向进行展望。

关键词: 果蔬; 冷冻干燥; 干燥动力学模型; 节能降耗; 联合干燥

Abstract: The effects of different drying techniques on product quality and the relative advantages and industrialization obstacles of freeze-dried products were analyzed and compared in this study. The current practice in thin layer drying models of fruits and vegetables were discussed, and the characteristics of common models were also summarized. Furthermore, the effects of pre-freezing, such as pretreatment of freezing, control of freezing rate and regulation of ice nucleation on quality improvement and consumption reduction were clarified. This research focused on

the positive effects of combined drying technology on shortening drying time, improving quality, saving energy and reducing consumption, and then the industrialization prospect of microwave-freezing drying technology was proposed. The development of freeze-drying technology of fruits and vegetables was prospected.

Keywords: fruits and vegetables; freeze-drying; dynamic kinetics model; pretreatment; save energy and reduce consumption; combined drying

新鲜果蔬季节性强, 不易贮藏。干燥是果蔬保藏中应用最广泛的技术之一^[1]。随着果蔬休闲食品快速发展, 干燥技术的研究也不断深入。国内外相关研究主要集中在加工工艺及其工艺参数、干燥动力学以及干制果蔬品质等方面, 利用低能耗加工工艺, 在尽可能短的干燥时间内, 使新鲜果蔬的营养成分实现最大限度的保留, 获得最好的感官品质^[2]。

由于冷冻干燥(Freeze-drying, FD)过程是在真空、低温环境下进行, 不会破坏热敏性物质, 且还抑制了酶的生物活性和微生物的生长繁殖, 因而可以较好地保留新鲜果蔬的色、香、味、形及营养成分, 可制备出高品质的果蔬干制品。因此冻干果蔬能满足消费者对果蔬食品营养、美味、健康的追求, 然而由于高成本、高能耗、低产率, 它也是最昂贵的干燥工艺之一^[3-5]。为实现规模化产业化生产, 需进一步优化或者采取更有效的联合干燥技术以达到高品质、低能耗的要求。

研究^[6-7]表明, 除干燥条件、干燥机类型和物料特性

基金项目: 山东省重点研发计划项目(编号: 2017GHHY15127); 国家级大学生创新创业项目(编号: 201910426029)

作者简介: 王新珂, 女, 青岛科技大学在读本科生。

通信作者: 杨锡洪(1963—), 男, 青岛科技大学教授, 博士。

E-mail: yangxihong63@163.com

解万翠(1969—), 女, 青岛科技大学教授, 博士。

E-mail: xiewancui@163.com

收稿日期: 2019-12-26

等对冻干果蔬品质和干燥能耗有影响外,干燥前处理及预冻条件对FD过程同样具有重要作用。此外,相对于单一的干燥技术,冷冻联合干燥技术作为一种分阶段干燥的复合技术,结合冷冻干燥和其他干燥方式的优势实现互补,在干燥品质、成本能耗方面具有较好的优势,因而受到国内外学者和工业界的普遍关注,具有广阔的应用前景。

1 果蔬干燥技术及模型

1.1 干燥技术及干制后果蔬品质分析

根据干燥机理不同,将干燥分为热风干燥(Hot-air drying, AD)、微波干燥(Microwave drying, MD)、真空干燥(Vacuum drying, VD)、FD和红外干燥(Infrared radiation drying, IRD)等方式。AD和MD虽然生产成本不高、工业应用广泛,但却分别因营养损失严重、加热均匀性差,严重影响了产品品质;另外3种干燥方式在产品品质上具有明显优势,但因为真空干燥热量传递困难、FD生产能耗高、红外干燥穿透能力有限各种技术原因,难以在生产实践中大规模应用。

FD以升华脱水为基础。在干燥所需的低温环境下,

它可以最大限度地减少风味和芳香化合物的损失,产生多孔结构,减小体积皱缩;此外,由于大部分酶促反应的停止,保持了新鲜果蔬的初始状态,产品具有良好的品质。

然而,由于保持低温状态、提供升华热、降低干燥室总压等操作,FD是一项高能耗、高成本的生产技术^[8]。因此,对整个干燥过程进行改进,提高干燥效率、降低能耗已成为许多研究的热点。

1.2 干燥过程数学建模及优化

干燥动力学通常用于描述干燥过程中传热传质的宏观和微观机理,受干燥方法、干燥条件和物料特性等多种因素的影响^[9],在改进设备设计、优化干燥过程和保质降耗方面有重要意义。薄层干燥是确定果蔬干燥动力学模型时广泛应用的一种方法^[10],常以水分比MR和时间t的关系描述干燥过程中的动态变化,利用决定系数R²、卡方χ²、均方误差RMSE等统计学指标验证模型的准确度。可以作为估算干燥曲线、改进干燥过程、最终实现最低能耗需求的一种重要工具。然而,在实际应用中,还没有一种薄层干燥模型可以有效地概括所有的果蔬干燥动力学。表1列举出了22种果蔬薄层干燥模型。

表1 果蔬薄层干燥模型^[10-12]

Table 1 Thin-layer models for the drying of fruits and vegetables

模型类别	模型名称	模型方程
理论模型	理论模型	$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 Dt}{4L^2}\right)$
	Henderson and Pabis model	$MR = B \exp(-rt)$
	Modified Henderson and Pabis	$MR = A \exp(-rt) + B \exp(-gt) + C \exp(-ht)$
	Midilli and others model	$MR = A \exp(-rt) + bt$
	Modified Midilli and others	$MR = A \exp(-rt) + B$
	Logaritlunic model	$MR = A \exp(-rt) + C$
	Two-Term model	$MR = A \exp(-r_1 t) + B \exp(-r_2 t)$
	Two-Term exponential model	$MR = A \exp(-r_0 t) + (1 - A) \exp(-r_1 At)$
	Hii and others model	$MR = A \exp(-r_1 t^n) + B \exp(-r_2 t^n)$
	Demir and others model	$MR = A \exp[(-rt)^n] + B$
半理论模型	Verma and others model	$MR = A \exp(-rt) + (1 - A) \exp(-gt)$
	Approximation of diffusion	$MR = A \exp(-rt) + (1 - A) \exp(-Brt)$
	Lewis model	$MR = \exp(-rt)$
	Page model	$MR = \exp(-rt^n)$
	Modified page (II)	$MR = \exp[(-rt)^n]$
	Modified page (III)	$MR = \exp\left(-\frac{t}{D^2}\right)^n$
	Aghbashlo and others model	$MR = \exp\left(\frac{r_1 t}{1 + r_2 t}\right)$
	Wang and Singh	$MR = At^2 + Bt + 1$
	Diamante and others model	$MR = C(\ln t)^2 + B \ln t + A$
	Weibull	$MR = A - B \exp(-r_0 t^n)$
经验模型	Thompson	$MR = B[\ln(MR)]^2 + A \ln(MR)$
	Silva and others model	$MR = \exp(-At - B\sqrt{t})$
	Peleg model	$MR = 1 - \frac{t}{Bt + A}$

对比表中各种薄层干燥模型,理论模型计算最为复杂,半理论模型由理论模型简化而来,半经验模型是以 Lewis 模型为基础的改进,经验模型则是完全根据试验数据拟合得到的。根据各模型的特点以及果蔬高含水率的特性,半理论模型和半经验模型被广泛应用于估算果蔬干燥动力学。特别是, Lewis、Henderson 和 Pabis 以及 Page 等数学模型在 FD 中应用最为广泛^[13-15]。陈雪珍等^[16]对 FD 野生蕨菜进行动力学研究,构建 Page 模型:

$$\begin{cases} MR = \exp(-rt^n) \\ r = -1.89 + 8.07P + 0.000\ 102V - 0.033\ 8I \\ n = 0.687 - 0.055\ 8P + 0.001\ 97V + 0.008\ 23I \end{cases} \quad (1)$$

式中:

MR ——水分比;

r ——干燥常数, s^{-1} ;

t ——干燥时间, min;

n ——模型常数;

P ——真空度, MPa;

V ——冷冻温度, $^{\circ}C$;

I ——装盘量, kg/m^2 。

由式(1)可知, Page 模型中待定常数 r 、 n 的值均与真空度、冷冻温度和装盘量呈相关关系,表明干燥曲线受真空度、冷冻温度、装盘量等变量参数影响。经验证该模型的预测值与试验值相差不大,可较为准确地预测冻干过程中蕨菜的水分变化。

在提质降耗方面,除了可以通过建立干燥动力学模型、改变干燥参数进而优化干燥过程外,当前的研究主要还集中在控制前处理方式、预冻方式和使用联合干燥技术等方面。

2 节能降耗新技术研发

2.1 前处理及预冻

漂烫、护色等前处理技术在去除部分水分的同时,改变组织形态,不仅可以提高产品的品质、延长货架期,而且可以加快干燥速率、降低能耗^[17-18]。Parniakov 等^[19]、Wu 等^[20]分别研究了高压脉冲电场(Pulsed electric field, PEF)对苹果的影响,均证实 PEF 处理,可以提高复水性和孔隙率,加快升华干燥速率。此外, PEF 具有传递快速均匀、升温小、处理时间短等特点,特别适合某些热敏性果蔬的处理,在 FD 领域的应用前景广阔。

超声波可通过空化、微孔通道和海绵结构等作用,提高果蔬渗透过程中失水率和固形物得率,缩短干燥时间,改善产品品质。Cao 等^[21]分别在 10, 30, 45, 60 W/L 4 种功率下,对大麦草进行 10 min 超声波处理,与未处理组相比, FD 能耗分别降低了 5%, 8%, 19%, 19%, 同时玻璃化转变温度提高、水分活度降低,有效地提高了大麦 FD 品

质;王海鸥等^[22]比较分析热烫、超声波和护色液 3 种处理方式对苹果片的影响,发现热烫组和超声波组分别比护色液组缩短 FD 耗时 12%, 20%, 并发现 FD 耗时越短,复水比越高。

根据果蔬物性不同,选用一种或多种合适的前处理方式,可以有效加快干燥速率,提升产品质量,最大程度地满足市场需求。预冻处理改变冷冻速率和过冷度可影响冰晶尺寸大小和分布情况,进而影响后续升华干燥过程。

Hiroshika 等^[23]研究发现,慢速冷冻形成的冰晶颗粒大而少,升华后留下的宽敞孔道减小了水蒸气的迁移阻力,利于提高升华干燥速率; Petropoulos 等^[24]研究发现,快速冷冻会导致冰晶来不及生长就结晶完成,形成的冰晶颗粒小而多,小冰晶在升华后会形成细微的孔道,增加水蒸气的迁移阻力,降低了升华干燥速率。Sitar 等^[25]研究发现,在升华干燥阶段,孔径大小对干燥速率有显著影响,成核孔径越大,第一次干燥时间越短。此外,过冷度较高时,成核温度较低,结晶热能够相对快速的去除,形成的冰晶颗粒小而多;相反,过冷度较低时,成核温度较高,形成的冰晶颗粒大而少,提高了升华速率。

预冻环节形成的冰晶颗粒大、数量少,可以提高升华干燥速率,但作为导致细胞损伤的主要原因,冰晶颗粒越大、数量越多,对细胞结构的破坏越严重,各种理化感官品质越差。因此,控制适宜的冷冻速率和调节冰晶成核,使其同时满足质量和能耗的需求,极为重要。

2.2 联合干燥新技术

联合干燥是结合各种干燥方式的优点,将两种或两种以上的干燥方式优势互补,分阶段进行的一种复合干燥技术,可弥补单一干燥方式中产品品质差、干燥效率低等缺点,具有最大程度保留物料原有感官品质和色泽的特点^[26-29]。目前较常用联合干燥技术见表 2。

相较其他联合干燥技术,冷冻联合干燥技术结合了 FD 高品质和其他干燥低耗能的优点,在提高能源利用率和产品质量方面均具有明显优势,应用前景广阔。目前常见的冷冻联合干燥技术有热风—冷冻、微波—冷冻和红外—冷冻等联合干燥技术,其工艺流程见图 1。

2.2.1 冷冻—热风联合干燥 针对 AD 与 FD 的联合干燥技术,目前国内外公认的最优方案是先冻干处理到一定含水率,待物料骨架形成,再进行热风干燥,省去 FD 解析段,从而节约干燥时间,同时产品不会发生严重变形变色。

Phanindra 等^[38]在研究冷冻—热风联合干燥胡萝卜和南瓜中,发现联合干燥后产品的总类胡萝卜素受破坏程度相对较低,总能耗和干燥时间低于单一 FD 50%,其结果表明联合干燥在生产高质量、低能耗产品上有明显优势; Antal 等^[39]以苹果为研究对象,分别对 FD 和真

表 2 常见联合干燥技术及其特点^[29-37]

Table 2 Common combined drying technology and its influence

联合干燥技术	优点	缺点
微波—冷冻联合干燥	营养物质、香味物质保留率高,复水性好,质构稳固,干燥周期短,能耗低	设备成本高,产品终点难以判断
微波—真空联合干燥	微观结构、外观形状和营养品质好,安全环保,干燥时间短,干燥速率高	设备自动化水平低,干燥过程无法实时监测
微波—热风联合干燥	干燥均匀,复水性好,干燥时间短,生产成本低,具有杀菌效果	设备成本高,酯类物质减少,国内研究尚少
红外—热风联合干燥	果肉组织变形率低,酚类及花青素保留率高,生产效率高,干燥时间短,能耗低	受热均匀度差,研究少
红外—微波联合干燥	能耗大幅度降低,速率快	感官品质差,产品品质低
红外—真空联合干燥	干燥速率快	复水性差,产品品质低
红外—冷冻联合干燥	产品品质高,较大程度接近新鲜物料,能耗低	产业化应用少,研究尚少
热风—冷冻联合干燥	产品品质高, V _c 及营养物质保留率高,色泽自然,能耗低,应用广泛,产业化	脱水速度慢
热风—真空联合干燥	产品品质较高,干燥时间缩短,加工成本降低	应用程度较低,产品品质难控制

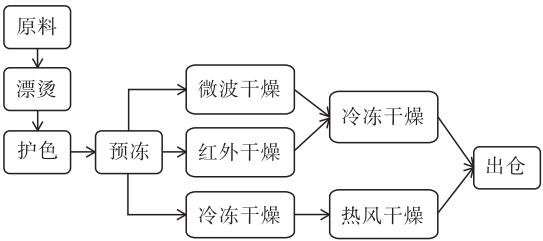
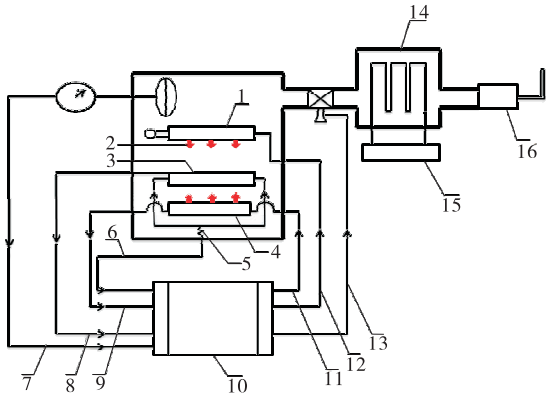


图 1 联合干燥工艺流程图
Figure 1 Process flow of combined drying

空—热风冷冻干燥工艺进行对比,结果表明与单一干燥相比,联合干燥时间缩短 27.3% 左右,能耗降低 34.5% 左右;杨佳琪等^[40]在比较不同干燥方式对香蕉切片品质的影响中,确定冷冻—热风联合干燥的较优工艺参数为冷冻时间 3 h、中间转换点含水率 40%、热风温度 70 ℃,产品外形及品质接近冻干产品,干燥时间仅为 FD 的 77.3%;黄娇丽等^[41]研究高菜冷冻—热风联合干燥的最优工艺参数,结果发现,FD 20 h+AD 1 h 的产品与冻干产品在品质上无显著差异,但能耗节省 33%。FD 的解析干燥阶段耗时长,除水少,干燥效率低;因此,在此阶段将干燥方式转为热风干燥,可以在保持产品品质前提下有效降低干燥能耗。

AD 与 FD 技术的联合应用发展较为成熟,因其低能耗已被广泛运用到实际生产中,但产品质量仍较差,如何进一步提高热风冷冻联合干燥产品质量是今后研究的重点^[42]。

2.2.2 微波—冷冻联合干燥 MD 与 FD 技术联合使用,是现今果蔬干燥中最具有潜力的研究方向之一。研究^[43]发现,MD、FD 的联合使用可将干燥时间显著缩短至传统



1. 真空室 2. 微波传导 3. 产品托盘 4. 加热板 5. 天平秤
6. 物料质量 7. 安培压力 8. 物料温度 9. 压板温度控制
10. 数据集成系统 11. 压板温度控制 12. 微波效率控制
13. 压力控制 14. 冷凝器 15. 制冷系统 16. 真空泵

图 2 微波—冷冻联合干燥系统^[34]

Figure 2 Microwave freezing combined drying system

FD 的 1/3。图 2 给出了联合干燥的设备简图^[34],即在传统的冷冻干燥机内加入微波系统,利用微波加热替代传统的传导加热。虽然这种设备的初始资本较高于传统,但干燥过程中可明显降低能耗,提高生产效率,从而大大降低了生产成本。

Jiang 等^[35]在干燥秋葵的研究中,对比微波—冷冻联合、热风—微波联合、单一热风、冷冻和微波真空干燥 5 种干燥方法对秋葵干燥品质和速率的影响,发现在抗氧化性能和色泽的保护上,微波—冷冻联合与 FD 相似,显著优于其他 3 种,但微波—冷冻联合硬度、脆度较高,干燥时间和能耗分别降低了约 75.36% 和 71.92%;Duan 等^[44]

通过对甘蓝干燥工艺以及杀菌特性的研究,发现微波—真空冷冻联合干燥与普通 FD 相比,联合干燥产品的热敏性成分保存率虽然略低,但干燥时间明显缩短,且有明显的杀菌效果;Pei 等^[45]在对干燥香菇挥发性成分的研究中,发现微波、冷冻组合的干燥产品不仅味觉活性氨基酸含量高,与新鲜产品更为接近,且干燥效率高、能耗低;汤梦情等^[46]在对芦笋 MD 与 FD 联合干燥的研究中,发现 MD 后再 FD,脱水率和色泽均优于单一干燥,此外与 FD 相比,脱水时间缩短 40%,大幅降低干燥总能耗。较单一冷冻干燥相比,联合干燥所需外源温度更低,因而在提质降耗的同时,可以更好地保留原料的营养物质和色泽。

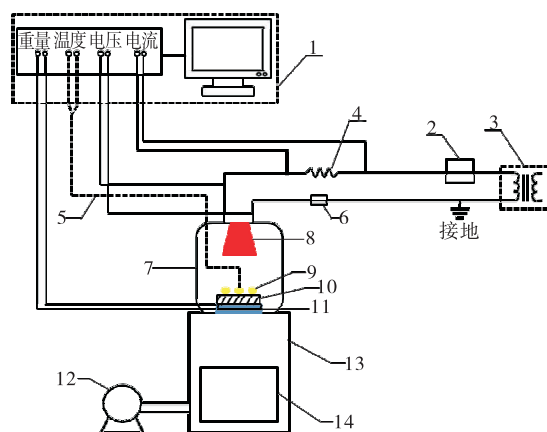
微波—冷冻联合干燥优势明显,其产品营养物质保留率远高于单一微波干燥,干燥时间远低于单一 FD,但在实际应用中仍有许多问题需要解决,在过去几十年中,只在实验室中发展起来,直到现在才应用于工业中。随着微波硬件的发展,联合设备的成本也逐渐下降,越来越具有产业化价值。目前已应用到生物制药、方便食品等产业,是未来工业化生产脱水果蔬的研究方向。

2.2.3 红外—冷冻联合干燥 红外—冷冻联合干燥是近年来一项新兴的果蔬干制技术,目前仍处于研发阶段,其机理研究不够深入,国内外研究尚少。

干燥过程中,红外辐射可以直接穿透物料并转化为分子振动而产热,因而可以减少热量在空气中的损耗,有效降低干燥能耗。Wang 等^[36]在香菇的 FD 与中红外干燥(Mid-infrared radiation drying, MIRD)联合干燥研究中,对比在 FD 之前或之后使用 MIRD 与 FD 单独使用时的香菇品质和干燥时间,发现在保证质量的前提下,两种联合技术的干燥时间都明显缩短,与单一 FD 相比,FD (4 h)+MIRD、MIRD(15 min)+FD 能耗分别降低 48%、30%。Apiny 等^[37]通过对香蕉片的红外辅助冷冻干燥(Infrared assisted freeze drying, IRAFD)研究,制备了动态红外辅助冷冻干燥系统(图 3),证实了红外辐射作为 FD 升华阶段的驱动力,可以显著缩短干燥时间,与冷冻干燥(696 min)相比,连续 IRAFD 可将干燥时间显著缩短 213 min,节省时间 70%以上;同时,IRAFD 改善了产品的脆度,未出现崩塌现象,保证了产品质量。

动态 IRFAD 系统主要包含控制温度的红外灯开关、红外起爆重量检测和红外灯的可变距离调控等装置,它不仅可以增强干燥效率,而且可以验证环境温度在干燥期间对冰晶升华的影响,为今后研究红外冷冻干燥的设备设计和干燥机理提供了借鉴。

红外—真空冷冻联合干燥虽起步晚、研究少,有关干燥动力学、能耗和产品质量等综合方面的信息有限,但不可否认红外辐射对降低 FD 能耗的有效作用;今后,需要研发更为先进的试验装置,建立干燥动力学模型以实现深入研究。



1. 数据采集系统 2. PID 保险丝 3. 可变变压器 4. 电流传感器
5. K 型热电偶 6. 安全保险丝 7. 亚克力室 8. 近红外灯
9. 冷冻香蕉 10. 样品盘 11. 电子天平 12. 真空泵 13. 冷冻干燥机 14. 冷阱

图 3 动态红外辅助冷冻干燥系统^[37]

Figure 3 Infrared assisted freeze drying system: Schematic diagram on the left and equipment diagram on the right

3 展望

冻干产品因兼具营养健康、新颖美味、易储便携等特点,符合食品界的发展潮流,受到消费者的普遍青睐。冻干技术与其他干燥技术的联合使用,使干燥果蔬的品质和生产能耗得到进一步改善,因而有必要阐明单一技术干燥进程中的影响因子,充分发挥联合干燥的巨大优势。

(1) 最佳转换点的研究:联合干燥过程中,判断物料的变形、变色是难点,两种干燥方式的水分转换点是影响最终产品品质的关键因素,该点的选取是以高品质和低能耗为前提,常以转换点的含水率为指标进行衡量^[47]。比如,转换点含水率过大,达不到降低能耗的效果;含水率过小,则对产品品质有较大的消极影响。因此,综合品质和能耗指标,选择合适的转换点至关重要。

(2) 联合干燥动力学模型的建立:应用最广泛的果蔬薄层干燥模型有 3 种,根据具体试验条件及相关数据筛选最佳干燥动力学模型,预测干燥过程动态变化,探讨传热特性。进一步研究影响品质和速率的可能因子,协调如物料厚度、装载量等各物料参数之间的关系,使其能较好地适应各个干燥阶段,减少在多次转换之间的停留处理时间;确定不同干燥方式的特定参数,如热风干燥的加热温度、微波干燥的微波功率、红外干燥的辐照距离以及冷冻干燥的真空度等,实现高效率、能耗低、环保的联合干燥技术。

(3) 联合干燥设备的改进:改进各种干燥设备,优化转换连接技术,提高工艺自动化控制程度,实现连续化生产以及冷凝器损耗热量的回收利用,仍有待进一步研究。

今后,如何将实验室最优的联合干燥方案最大化地应用到实际生产中,去,还需研究者共同探讨。

参考文献

- [1] CUI Zheng-wei, XU Shi-ying, SUN Da-wen. Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying[J]. *Drying Technology*, 2003(7): 1 173-1 184.
- [2] HU Qing-guo, ZHANG Min, ARUN S. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave Combination[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(4): 977-982.
- [3] PEI Fei, SHI Ying, MARIGA Alfred Mugambi, et al. Comparison of freeze-drying and freeze-drying combined with microwave vacuum drying methods on drying kinetics and rehydration characteristics of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(6): 1 629-1 639.
- [4] 闫师杰, 董吉林. 制冷技术与食品冷冻冷藏设施设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 261.
- [5] EDINARA Adelaide Boss, RUBENS Maciel Filho, EDUARDO Coselli Vasco de Toledo. Freeze drying process: Real time model and optimization[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2004, 43(12): 1 475-1 485.
- [6] MONIKA Mieszczakowska-Frac, BARBARA Dyki, DOROTA Konopacka. Effects of ultrasound on polyphenol retention in apples after the application of predrying treatments in liquid medium [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(3): 543-552.
- [7] 万国福, 张嫚, 张兰. 水芹蔬菜冻干工艺中预冻条件分析[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(20): 61-64.
- [8] DONSÌ G, FERRARI G, MATTEO D I. Utilization of combined processes in freeze-drying of shrimps[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2001, 79(3): 152-159.
- [9] GIRI S K, PRASAD S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 512-521.
- [10] KADAM D M, GOYAL R K, GUPTA M K. Mathematical modeling of convective thin-layer drying of basil leaves[J]. *Med Plants Res*, 2011, 5(19): 4 721-4 730.
- [11] SUNA Senem. Effects of hot air, microwave and vacuum drying on drying characteristics and in vitro bioaccessibility of medlar fruit leather (pestil)[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(5): 616-623.
- [12] PUJANTO A, SIDHI S D P, NURFAUZI A. Mathematical modeling of thin layer drying of salted yellowtail fish under open sun and in greenhouse dryer[J]. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 2019, 91(7): 391-399.
- [13] IBRAHIM Doymaz. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 79(1): 243-248.
- [14] SONG Xian-ju, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Drying characteristics and kinetics of vacuum microwave-dried potato slices[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(9): 969-974.
- [15] RAQUEL P F Guiné, PINHO S, BARROCA M J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*)[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2011, 89(4): 422-428.
- [16] 陈雪珍, 毛杰. 野生蕨菜真空冷冻干燥动力学及产品特性研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(17): 1-5, 21.
- [17] GARCÍA P. Osmotic dehydration of Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(2): 154-160.
- [18] AN Ke-jing, WU Ji-jun, TANG Dao-bang, et al. Effect of Carbonic maceration (CM) on mass transfer characteristics and quality attributes of Sanhua Plum (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 87: 537-545.
- [19] PARNIAKOV O, BALS O, LEOVKA N, et al. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 35: 52-57.
- [20] WU Ya-liu, GUO Yu-ming, ZHANG Dong-guang. Study of the effect of high-pulsed electric field treatment on vacuum freeze-drying of apples[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(14): 1 714-1 720.
- [21] CAO Xiao-huan, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40(1): 333-340.
- [22] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 预处理方式对真空冷冻干燥苹果片品质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(11): 126-130.
- [23] HIROSHIKA Goshima, GABSOO Do, KYUYA Nakagawa. Impact of ice morphology on design space of pharmaceutical freeze-drying[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2016, 105(6): 1 920-1 933.
- [24] PETROPOULOUS J H, PETROU J K, LIAPIS A I. Network model investigation of gas transport in bidisperse porous adsorbents[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 1991, 30(6): 1 281-1 289.

- [25] SITAR A, SKRLEC K, VOGLAR A, et al. Effects of controlled nucleation on freeze-drying lactose and mannitol aqueous solutions[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(10): 1 263-1 272.
- [26] FATOUH M, METWALLY M N, HELALI A B, et al. Herbs drying using a heat pump dryer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(16): 2 629-2 643.
- [27] WOJDYLO A, FIGIEL A, OSZMIANSKI J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color and antioxidant activity of strawberry fruits[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(4): 1 337-1 343.
- [28] 关志强, 郑立静, 李敏. 罗非鱼片热泵—微波联合干燥工艺[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 270-275.
- [29] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劬. 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.
- [30] GHABOOS S H H, ARDABILI S M S, KASHANINEJAD M, et al. Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(5): 2 380-2 388.
- [31] WANG Jun, SHENG Kui-chuan. Far-infrared and microwave drying of peach[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2006, 39(3): 247-255.
- [32] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 228: 12-24.
- [33] LAO Yan-yan, ZHANG Min, DEVAHASTIN Sakamon, et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(5/6): 621-633.
- [34] ZHANG M, TANG J, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(10): 524-534.
- [35] JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jing, 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.
- [36] WANG Hong-cai, ZHANG Min, ADHIKARI B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation[J]. *Food and Bioprocesses*, 2015, 94: 507-517.
- [37] APINYA Khampakool, SALINEE Soisungwan, SUNG Hee Park. Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 99: 355-363.
- [38] PHANINDRA KUMAR H S, RADHAKRISHNA K, NAGARAGU P K, et al. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2007, 25(6): 447-460.
- [39] ANTAL T, KEREKES B. Investigation of hot air-and infrared-assisted freeze-drying of apple[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2016, 40(2): 257-269.
- [40] 杨佳琪, 袁越锦, 王栋. 不同干燥方式对香蕉切片干燥品质的影响试验[J]. *食品科技*, 2019, 44(3): 74-79.
- [41] 黄娇丽, 黄丽, 韦保耀, 等. 高菜真空冷冻与热风联合干燥工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2013(11): 227-231.
- [42] ORAK H H, AKTAS T, YAGER H, et al. Effects of hot air and freeze drying methods on antioxidant activity, colour and some nutritional characteristics of strawberry tree (*Arbutus unedo* L) fruit[J]. *Food Science and Technology International*, 2012, 18(4): 391-402.
- [43] WANG Wei, CHEN Guo-hua. Theoretical study on microwave freeze-drying of an aqueous pharmaceutical excipient with the aid of dielectric material[J]. *Drying Technology*, 2005, 23(9/10/11): 2 147-2 168.
- [44] DUAN Xu, ZHANG Min, MUJUMDAR A S. Studies on the microwave freeze drying technique and sterilization characteristics of cabbage[J]. *Drying Technology*, 2007, 25: 1 725-1 730.
- [45] PEI Fei, YANG Wen-jian, MA Ning, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 72: 1 096-1 127.
- [46] 汤梦情, 陈宏伟, 朱蕴兰, 等. 微波真空与真空冷冻组合干燥对芦笋营养与品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(5): 76-81.
- [47] 杨婧, 邓媛元, 张雁, 等. 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼干品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(5): 175-183.