

郑霞, 万江静, 高振江, 等. 红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 1-6.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.001

红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望

郑霞^{1,2}, 万江静², 高振江¹, 肖红伟¹, 潘忠礼³, 马海乐⁴, 唐明祥², 姚雪东²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100037; 2. 石河子大学, 新疆石河子 832000;

3. 加州大学生物与农业工程学系, 美国加州 95616; 4. 江苏大学食品科学与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 红外辐射加热干燥是利用红外加热器发射出的红外线照射到被加热物料上, 并被吸收转化成热能而实现加热和干燥, 具有干燥时间短、产品品质较好和营养损失少、装备结构简单、形式多样、占用空间小等特点, 是一种节能环保的干燥技术。在阐述当前国内外果蔬红外干燥加工及联合其他干燥技术研究应用现状的基础上, 提出红外联合其他干燥技术是今后的研究方向和发展趋势。

关键词: 红外; 联合干燥; 微波; 真空; 冷冻; 果蔬; 现状; 展望

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0001-06

果蔬富含维生素、有机酸、矿物质和膳食纤维等营养成分, 而干燥脱水是果蔬安全贮藏和延长货架期最常见的一种加工方式之一。目前的果蔬干燥技术主要涉及自然晾晒、烘房干燥、热风干燥、微波干燥、喷雾干燥、低温真空干燥、真空脉动干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥、变温压差膨化干燥、气体射流冲击干燥、低压过热蒸汽干燥、射频干燥和红外辐射加热干燥等。

红外辐射加热干燥是利用红外加热器发射出的红外线照射到被加热物料上, 并被吸收转化成热能, 从而实现加热和干燥的一种方法, 主要影响因子有干燥温度、切片厚度、辐射距离和红外功率等^[1-2]。红外辐射是指波长范围介于微波和可见光之间、波长为 0.76~1 000 μm 的电磁波。根据波长的不同, 红外辐射分为近红外、中红外和远红外, 其中远红外波长为 4~1 000 μm ^[3-5]。在农业物料加工中, 红外加热技术主要以远红外辐射为主, 这是由于农业物料在 2.5~100 μm 中红外和远红外辐射中吸收能量的效率最高^[2-3]。

1 国内外果蔬干燥脱水研究现状

果蔬红外干燥的研究以干燥动力学研究居多, 影响因素主要包括 2 个方面: 一是物料本身特性, 包括结构特性、生物特性、理化特性及热物理特性等内在因素; 二是供热条件, 包括供热参数与供热方式, 供热参数又包括辐射加热温度、加热功率、干球及湿球温度、气流方向与速度等, 供热方式又包括恒条件供热和变条件供热, 快速升温或慢速升温以及恒温时间、降温方式等外在因素。综合内在因素与外在因素, 探明不同物料内部的水分如何扩散到表面, 如何从表面蒸发, 就是研究水在物料内部迁移或扩散过程受到哪些阻力, 这些阻力又

与物料的结构及吸取外界的能量有何关系, 即研究湿物料的传热、传质特性。在干燥过程中, 被干物料的性质如结构、形状、大小、热稳定性及化学稳定性等, 都是决定干燥工艺的重要因素, 尤其水与不同类物料结合产生新的特性对干燥作用的影响更大。

1.1 单一红外辐射

近年来, 国内外一些学者积极开展将红外辐射加热技术应用于食品和农产品干燥等的研究。2005 年, Nowak 等对苹果片进行红外干燥与热风干燥 2 种方法的对比试验发现, 采用红外干制的苹果片干燥速率和效率更高, 外观品质较好, 但红外线穿透深度仅约为 10 mm, 因此, 苹果片的厚度不宜超过 10 mm; 干制苹果片的内部结构变化与干燥速率有关而与干燥方式无关, 干燥速率越大, 内部产生的收缩应力越大, 当应力超过物料本身的最大形变力就会发生形变^[5]。2006 年, Gabel 等研究 60、70、80 $^{\circ}\text{C}$ 循环热风条件下利用催化红外加热洋葱和强制空气对流加热条件下干燥洋葱时发现, 催化红外干燥洋葱, 无论有无热风循环都能缩短干燥时间, 且红外温度较低和强制空气对流温度较高时洋葱颜色发白略黄, 品质较好, 红外温度过高和强制空气对流时间越长, 洋葱颜色变深; 催化红外干燥的洋葱, 其酵母菌和微菌数量与强制对流干燥相比大大减少, 催化红外加热用在洋葱干燥的早期阶段比较合适^[6]。2008 年, Shi 等对新鲜蓝莓和浸糖蓝莓进行红外干燥特性和品质研究, 结果表明, 相对于热风干燥, 红外干燥的蓝莓样品质地好, 干燥时间明显缩短^[7]; 同年, 研究蓝莓大小和氢氧化钠预处理对红外干燥特性的影响, 结果表明, 干燥速率随蓝莓尺寸减小而增加, 氢氧化钠预处理提高了干燥速率, 加速了水分扩散, 减少了高温干燥条件下蓝莓的破损^[8]。2008 年, Jezek 等研究红外温度、样品尺寸和样品处理对芹菜干燥特性的影响, 结果发现, 75 $^{\circ}\text{C}$ 时放置在最高处的样品, 其有效扩散系数是 $3.97 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; 50 $^{\circ}\text{C}$ 放置在最低处的样品, 其有效扩散系数是 $2.33 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[9]。2009 年, Zhu 等研究红外杀青和苹果片干燥, 结果表明, 随红外辐射强度的增大和苹果片厚度的减小, 物料表面的温度升温快, 有利于加速干燥失水和酶失活, 红外加热可用于高品质果蔬加工的局部

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 新疆生产建设兵团科技支疆计划(编号: 2013AB019)。

作者简介: 郑霞(1969—), 女, 博士, 副教授, 从事农产品加工技术及装备研究。E-mail: 124899256@qq.com。

通信作者: 高振江, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品(食品)加工技术与装备研究。E-mail: zjgao@cau.edu.cn。

脱水 and 灭酶^[10-11]。2011 年, Doymaz 研究了 104、125、146、167 W 不同红外功率对甘薯片干燥特性和复水比的影响, 结果显示, 红外功率增加可以缩短干燥时间, 建立的对数模型较好; 水分有效扩散系数受红外功率影响较大, 在 $1.31 \times 10^{-10} \sim 3.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间发生变化^[12]。2013 年, Hosain 等研究蘑菇在 50 ~ 90 °C 远红外干燥温度条件下的干燥特性发现, 干燥过程为降速干燥, 干燥时间在 60 ~ 168 min 范围内, 适合对数模型; 水分有效扩散系数随温度增加而增加, 并在 $8.039 \times 10^{-10} \sim 2.0618 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内变动; 水分则随温度增加而减少; 蘑菇片干燥的能耗为 2.87 ~ 5.36 kW/h^[13]。2013 年, Li 等研究在不使用碱液和水的情况下利用红外加热去除番茄表皮, 试验结果显示, 红外加热 30 ~ 75 s, 去皮损失减少 8.3% ~ 15.8%、皮厚变薄 0.38 ~ 1.06 mm; 相似去皮容易度的情况下, 去皮样品的质地有所提高; 红外加热增加了番茄皮的弹性模量, 减少了皮的黏合度; 红外加热容易使番茄表皮裂碎, 表层皮膜熔化、细胞层分裂、细胞壁被破坏, 从而引起番茄皮分离^[14]。2013 年, 尹旭敏等对茶树菇进行 60 °C 热风干燥、70 °C 真空干燥和 70 °C 远红外干燥等 3 种干燥方法对比, 研究干燥方法对茶树菇复水比、外观品质和游离氨基酸等干制品质的影响, 结果表明, 3 种不同干燥方法对茶树菇干制样品的复水比、外观品质、色泽和游离氨基酸等干制品质影响较大, 其中茶树菇干制样品复水比大小依次为远红外干燥 > 热风干燥 > 真空干燥, 干制样品及其复水后的外观品质优劣依次为远红外干燥 > 热风干燥 > 真空干燥, 远红外干燥和热风干燥的干制样品色泽明显优于真空干燥; 不同干燥方法所得茶树菇干制样品间的色差、亮度和黄色差异极显著, 红色差异显著; 干制样品中的氨基酸总量大小依次为真空干燥 > 热风干燥 > 远红外干燥; 远红外干燥的样品复水性及外观品质等都优于热风和真空干燥^[15]。2014 年, Xu 等研究在 2.4、3.0、5.0、6.0 μm 不同红外波长干燥条件下对海藻温度分布和物料内外表面温度变化的影响, 并检测样品干燥前后的复水比、颜色和质地等品质指标, 结果表明, 红外干燥时间海藻约需 120 min, 比热风干燥需 275 min 时间缩短了 56%; 红外波长为 2.4 μm 时干燥的样品和热风干燥的样品比较一致, 干燥速率较高, 该样品在硬度、弹性、黏性和咀嚼性等较接近烫漂样品, 红外干燥海藻具有较大利用潜力^[16]。2014 年, Qi 等研究在热风干燥、间歇红外干燥和微波喷动床等 3 种不同干燥条件下香菇的颜色、质地和复水能力, 结果显示, 热风干燥与红外和微波喷动床干燥相比, 香菇干燥时间更长, 品质更差; 微波喷动床干燥的香菇其复水后最接近原材料, 感官好、总糖含量高、品质优^[17]。2014 年, Azam 等采用热风干燥、射频干燥、红外干燥和微波辅助热风 4 种方法研究干燥后生菜的颜色、密度、微观结构、复水能力和质地等干燥品质特性, 并对比其干燥时间, 结果表明, 300 g 生菜片在射频干燥条件下的干燥时间最短, 为 120 min; 其次是微波辅助热风, 时间为 140 min; 红外干燥时间是 180 min, 热风干燥时间最长, 需要 360 min; 射频干燥的样品均匀, 品质在 4 种干燥方法中最好^[18]。

1.2 果蔬红外联合干燥技术

红外技术应用于食品干燥比一般干燥方法优越, 就此学者们已达成共识。与对流加热干燥等相比, 红外加热干燥具

有干燥时间短、干制品品质好、节约能源、装备结构简单、形式多样、占用空间小等优点^[15-16]。然而, 单一红外干燥技术也会存在许多不足。近年来, 研究人员积极探索一种能扬长避短和优势互补的果蔬红外干燥技术, 即红外联合干燥技术, 该技术依据果蔬的特性, 将包括红外技术在内的 2 种或 2 种以上的干燥方式复合使用。目前, 已有的果蔬红外联合干燥技术有红外联合热风干燥、红外联合热泵干燥、红外联合微波真空干燥、红外联合真空干燥、红外联合气体射流冲击干燥、红外联合过热蒸汽干燥、红外联合流化床干燥等。

1.2.1 果蔬红外联合热风干燥 热风干燥能及时带走物料表面蒸发的水汽, 使内部水分得到扩散。远红外辐射能使物料内部水分得到加热, 形成内高外低的温度梯度, 特别在后期, 这种梯度更为明显, 且与水分梯度方向一致。

1997 年, 王俊等对香菇进行远红外与热风联合干燥试验, 改变 2 种干燥方法的顺序、温度、转换点含水率及缓苏时间 4 个因子, 分析这 4 个因子对干燥质量、脱水速率和单位能耗的影响, 结果表明, 热风联合远红外干燥效果优于单一热风干燥和远红外干燥; 以质量为主要目的, 宜采用先热风低温后远红外高温; 以干燥速率为目的, 宜采用先热风后远红外; 以降低单位能耗为目的, 则宜采用远红外高温^[19]。2005 年, Kumar 等对洋葱进行红外联合热风干燥, 以洋葱颜色、丙酮酸含量和风味为评价指标, 分析洋葱在不同红外温度、洋葱片厚、空气温度和气流速率条件下的干燥特性, 结果表明, 2 mm 厚洋葱片在低温 60 °C、风速 2 m/s 和空气温度 40 °C 条件下风味和颜色较好, 相比单一红外干燥和热风干燥, 红外联合热风干燥洋葱的时间较短、品质较好^[20]。2007 年, 孙传祝等将红外联合热风干燥技术应用于蔬菜脱水发现, 红外联合热风干燥速率远高于单一的热风干燥^[21-22]。2013 年, 高飞对红枣进行微波、远红外、真空冷冻及热风联合干燥试验, 并对干燥成品的断面进行电镜扫描发现, 热风联合红外所得产品其组织间的空洞明显较大而均匀, 各干制样品感官品质优劣顺序为热风联合真空冷冻 > 热风联合红外 > 单一真空冷冻 > 热风联合微波 > 单一热风 > 单一红外 > 单一微波, 热风联合红外干燥对红枣进行干燥技术可行, 干制成品果肉组织变形率小, 能够较大程度保持红枣原有的形状^[23]。2014 年, Sui 等研究顺序红外、对流、顺序红外 - 对流干燥酿酒对葡萄渣的干燥特性、灭菌效果及果渣对多酚和花青素含量的影响, 结果表明, 红外干燥具有较高的干燥速率, 相比其他的干燥方法, 其干燥时间可缩短 47.3%, 顺序红外和对流干燥比单一对流干燥速率高; 单一红外干燥和 90 °C 对流干燥时, 酵母存活率、霉菌和细菌最小, 高温杀菌效果好; 顺序红外对流干燥过程中, 延长红外加热阶段的干燥时间, 不能达到很好的灭菌效果; 单一红外方法干燥的酿酒葡萄渣多酚和花青素含量高, 降低干燥温度, 能减少这 2 种物质的损失^[24]。2015 年, 谢小雷等研制适用于肉干加工的连续式脱水中红外 - 热风干燥设备 (图 1), 包括进料段、加热段和出料冷却段 3 个单元, 其中加热段由输送系统、加热系统、对流循环系统和控制系统等组成, 该设备通过红外加热波长的定向设计及辐射强度的有效控制, 加大红外辐射能的利用, 提高脱水效率。试验研究比较分析了该干燥设备与传统热风干燥设备对牛肉干脱水效率及品质的影响, 结果表明, 在加热功率 105 kW、加热温度 70 °C、热风

风速 1 m/s、冷却风速 3 m/s、加热距离 8 cm 的相同条件下,连续式干燥设备能够加快牛肉干肌肉蛋白的变性,降低干燥活化能,减少脱水所需的能量,降低干燥耗时,提高生产效率,与传统热风干燥设备相比,其活化能和干燥耗时分别降低 10.33% 和 57.14%,生产效率提高了 2 倍^[25]。

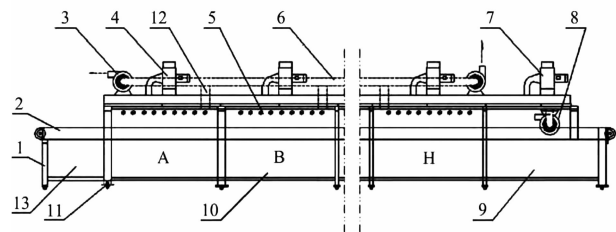


图1 连续式中红外-热风组合干燥设备结构示意图

1.2.2 果蔬红外联合热泵干燥 热泵干燥是在 35 ~ 55 °C 较低温度下对果蔬进行脱水,其特点是干燥过程中不易发生热敏反应、氧化变质等问题,物料的营养成分及色泽风味损失较少。

2009 年,徐刚等将热泵与远红外辐射联合干燥用于胡萝卜片的干制,研究不同预处理条件、风速、远红外辐射强度和辐射距离对干燥速率和产品比色值的影响,发现胡萝卜片在该联合干燥条件下,干燥时间短、能耗低、产品质量好、加工成本低、产品色泽好、复水性好,同时可以杀菌,避免微生物污染问题,适用于大部分热敏性物料的干燥加工^[26]。

1.2.3 果蔬红外联合微波真空干燥 微波干燥是利用介质损耗原理,使物料中的水分子在微波作用下急剧摩擦、碰撞,使物料产生热化和膨化等一系列变化,从而达到加热干燥的目的。微波真空干燥是在真空条件下,将微波辐射作为加热源进行加热干燥的一种方法,其优点是低温、快速、高效。

2006 年,王俊等将微波干燥和远红外联合用于黄桃的干制,研究红外温度、微波干燥功率和转换点对黄桃含水率、干燥速率、电耗和干燥质量的影响,结果发现,采用远红外微波联合干燥黄桃,其干燥效果比采用单一远红外干燥效果好,质量略优于单一微波干燥^[27];狄建兵等对壶瓶枣分别进行 300 W 微波、60 °C 远红外、远红外-微波联合及 60 °C 电热恒温干燥发现,远红外联合微波干燥的成品总糖含量最高,联合干燥 34 min 仅次于单一微波干燥 10 min,且干制品品质较高^[28]。2014 年,曾目成在单一微波真空干燥和单一中短波红外干燥猕猴桃片的基础上,对猕猴桃片进行中短波红外与微波真空的组合干燥,结果发现,先中短波红外后进行微波真空干燥的猕猴桃片,感官品质较差且色泽恶化严重,可行性不好,而采用先微波真空后中短波红外联合干燥猕猴桃片所需干燥时间短,产品品质明显比单一干燥好,其干燥工艺为 460 W 微波干燥干制至水分含量为 70%,转用 60 °C 中短波红外干燥至终点^[29];Motevali 等对蘑菇进行红外干燥、微波干燥、红外联合热风干燥和红外联合微波干燥的能耗分析发现,红外联合微波干燥能最大程度上降低能耗^[30]。

1.2.4 果蔬红外联合真空干燥 2002 年,Mongpraneet 等用远红外-真空联合干燥方法干制洋葱发现,辐射强度对干燥

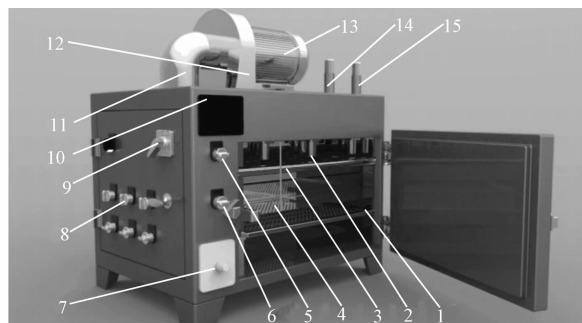
速率和样品品质有较大影响,干燥时间越长和干燥温度越高,样品复水特性越差^[31]。2008 年,胡洁以胡萝卜为原料,研究远红外真空干燥技术在果蔬干燥上的应用发现,远红外真空干燥过程中,干燥速率受辐射距离的影响很小,受干燥功率密度和真空度的影响较大,干燥功率密度越大,干燥速率越快,但产品质量出现下降;真空度小于 0.07 MPa 时对干燥速率的影响不大;干燥过程中的温度分布及变化规律与厚度相关;以干燥产品质量为主要目的的最优参数组合为:远红外干燥功率密度 2 W/g,辐射距离 155 mm,真空度 0.07 MPa^[32]。2009 年,徐凤英等将真空远红外辐射过热干燥技术应用于荔枝的干制,研究发现,此方法干燥荔枝,与辐射光谱匹配增大了干燥介质的过热度,可快速去水,其去水速率明显快于热风干燥^[33]。2014 年,刘云红等研究建立了真空近红外干燥马铃薯片的数学模型,在不同干燥条件下,可利用有限差分方法数学模拟样品温度和水分含量,计算结果与试验数据比较,表明不同干燥时间情况下,样品温度和水分的相关系数接近 1.0,相对误差小于 10%^[34]。

1.2.5 果蔬红外-冷冻联合干燥技术 2004 年,Lin 等对冻干甘薯进行热风干燥、冷冻干燥和冷冻联合远红外干燥对比研究发现,冷冻干燥联合远红外能减少甘薯干燥时间,其干燥阶段既有恒速干燥也有降速干燥^[35]。2007 年,Shih 等将红外联合冷冻干燥技术用于草莓片的干制,同时也进行单一红外、热风 and 单一冷冻干燥的对比,研究表明红外联合冷冻干燥方法制备草莓片不仅可以提高产品品质,还能加快处理速率同时减少能耗^[36]。2008 年,Pan 等用顺序红外联合冷冻对香蕉进行干燥,研究其对香蕉干燥特性和品质特性的影响,结果显示,当红外强度增加时,红外加热干燥速率比热风干燥速率显著提高,红外强度 4 000 W/m² 时,10 ~ 38 min 可以减少水分 40%;经过预先脱水的香蕉片在冷冻干燥期间,比没有预脱水的样品干燥慢;脱水前样品进行酸浸处理可以改善样品颜色,其冷冻干燥时间也比未酸浸的样品缩短;顺序红外联合冷冻干燥方法可缩短干燥时间,得到的香蕉片品质更好^[37]。

1.2.6 果蔬红外联合气体射流冲击干燥 气体射流冲击干燥技术是将加压后的热气流通过一定形状的喷嘴喷出,直接冲击到物料表面而带走物料中水分的一种干燥技术,其主要特点是热系数高、干燥效率高。

2009 年,Kocabiyyik 等用红外干燥胡萝卜片,研究不同红外功率和气流速度对干燥时间、单位能耗、缩水率、复水比和颜色的影响,结果显示,干燥速率随着干燥功率的增加而增加,当红外功率在 300、400、500 W,气流速度在 1.0、2.0 ms 时,干燥时间分别为 252、205、145 min 和 277、236、155 min,蒸发 1 kg 水的单位能耗为 12.22 ~ 14.58 MJ,其缩水率、复水比和颜色随干燥工艺参数的变化而变化^[38]。2010 年,Jaturonglumlert 等对果泥进行红外-对流联合干燥试验,研究其质热传递过程,经过修正相关性分析,根据努塞尔数获得偏差在 ±10% 的质热传递模型,为进一步缩短干燥时间,更好地保持果蔬干制品品质提供了技术支撑^[39]。2013 年,巨浩宇等采用红外-对流联合干燥方法研究干制苹果片时发现,辐射温度对干燥时间有显著的影响,其顺序为辐射温度 > 切片

厚度 > 辐射距离^[40]。2014 年,郑霞等将气体射流冲击干燥技术和红外辐射加热技术相结合应用于哈密瓜片的干燥,研究不同干燥温度、辐射距离和切片厚度对哈密瓜片干燥动力学、水分扩散系数及干燥活化能的影响(图 2),结果表明,哈密瓜片进行中短波红外联合气体射流冲击干燥可大幅缩短干燥时间,仅需 2~3.5 h;使用中短波联合气体射流冲击干燥技术时所需启动干燥能量较低,水分更容易脱去,干制的成品具有色好、风味浓、不黏牙、脆性好等特点^[41]。2015 年,李兆路等采用对流-红外干燥方法研究桑葚制干,结果表明,干燥温度对干燥速率影响较红外功率大,70 ℃ 对流干燥温度和 675 W 红外功率干燥条件下的物料品质最优,相比热风干燥和真空冷冻干燥,对流-红外联合干燥大大缩短了干燥时间,提高了产品的营养品质^[42]。2015 年,高鹤等对番木瓜进行对流-红外联合干燥与热风干燥的对比研究,结果表明,相同干燥温度下,中短波红外的干燥速率和复水速度均较快,复水比更大,色泽变化比较小,但其维生素 C 保留率却低于热风干燥^[43]。



1—物料托盘; 2—喷嘴; 3—红外加热管; 4—温度传感器; 5—触摸屏开关; 6—风机开关; 7—风速调节旋钮; 8—功率开关; 9—电源控制开关; 10—触摸屏; 11—进风管道; 12—回风管道; 13—离心风机; 14—进风口; 15—排湿口

图2 中短波红外联合气体射流冲击干燥机

近期研究表明,红外辐射加热联合气体射流冲击干燥技术为缩短片状和小颗粒状等果蔬的干燥时间、实施工业化生产提供了技术依据和新的选择,对果蔬产业和农产品等物料的干燥技术升级奠定了一定的研究基础。

1.2.7 果蔬红外联合过热蒸汽干燥 低压过热蒸汽干燥是指过热蒸汽直接与被干燥物料接触而去除水分的干燥方式,其特点是能实现无氧或少氧的干燥环境,干燥过程不会出现硬壳或结皮的现象,消除了进一步干燥可能出现的障碍,产品具有多孔结构,具有干燥效率高、能耗低和干燥产品质量好等优点。

2007 年,Nimmol 等进行香蕉低压过热蒸汽联合远红外的干燥和热传递研究,分析干燥介质温度和压力对干燥动力学和热传递的影响,结果表明,低压过热蒸汽远红外干燥比真空远红外干燥时间短,真空泵耗能比远红外或电加热能高;低压过热蒸汽远红外和真空远红外比相同条件下低压过热蒸汽能耗低,建议低压过热蒸汽联合远红外干燥香蕉的干燥温度和压力分别为 90 ℃、7 kPa^[44]。

1.2.8 果蔬红外联合其他干燥 2011 年,Dondee 等对大豆进行流化床与近红外联合干燥,由于该方法降低了豆粒内部的水分梯度和压力,减少了物料开裂和破损减少,从而提高了

样品品质。研究在 4、6、8 kW 不同红外功率、气流速度为 4.5 m/s、温度为 40 ℃、深度为 6 cm 的流化床等干燥条件下大豆微观组织结构如裂纹、破损和颜色等,结果表明,随近红外功率的增加,干燥速率增加,而水分逐渐减少,产生的裂纹降低,可以忽略不计^[45]。4、6 kW 近红外功率对泰国的大豆和动物饲料是可以接受的干燥功率。

2 果蔬红外联合干燥的研究趋势

目前,深入研究探讨果蔬联合干燥技术是实现果蔬产业可持续发展的必然趋势,而红外联合干燥技术研究还具有很大的发展空间。

2.1 基于物料对象的果蔬红外联合干燥技术及机理研究

不同果蔬种类的组织成分及存在状态有许多差异,干燥技术和方法也会有很大差异,因此,需要将不同果蔬物料对象和不同形态物料进行分类研究,如高糖果蔬和低糖果蔬、水分含量高的果蔬和水分含量低的果蔬、适合切片或打泥制片的果蔬和适合颗粒状或块状的果蔬等。另外,不同果蔬物料的干燥机理也需进行深入研究。

2.2 果蔬红外联合干燥关键工艺技术研究

果蔬单一干燥的工艺研究很多,红外联合干燥工艺的研究也逐渐被重视,联合干燥顺序、最优组合工艺参数的确定及干燥转换点的研究变得十分重要。目前研究表明,红外联合干燥工艺还处于初级阶段,其研究和应用前景较为广阔。

2.3 果蔬红外联合干燥的数学模型构建研究

数学模型对研究联合干燥机理及过程的优化、自动控制具有非常重要的意义,不同种类的果蔬需建立适合的数学模型。建立干燥过程中水分和温度的变化规律模型,预测和指导联合干燥工艺、提高产品质量十分必要,而模型的通用性与实际的干燥过程还相差很大,需深入研究^[46-50]。

2.4 基于感官品质和营养保持的果蔬红外联合干燥研究

目前,果蔬红外联合干燥研究方法较多,而有关研究方法的可行性多以干燥时间及感官品质作为评价指标。由于样品感官品质具有许多不确定因素,需对干制样品进行内部品质分析,以判断其主要营养成分的损耗情况,并结合其感官品质对干制样品进行品质评价。由于果蔬物料对象不同和市场需求变化,有的果蔬需要侧重于感官品质的研究,如色、香、味和脆性等^[51-54],而有的果蔬需要侧重于营养保持等的研究^[55-59],如红枣加热时间越长,维生素 C 营养损失越多^[60];而一些热敏性果蔬物料,由于其内部具有各向异性、多孔细胞结构,其干燥过程常伴有物理、化学及生物变化,如玻璃态转变、蛋白质变性 & Maillard 反应等^[61-63],因而干制品物料表面常出现结壳、收缩和褐变等^[64-66],影响了干制品的感官品质。因此,为提高干燥效率和干燥质量,开展热敏性物料的红外联合干燥研究也具有重要意义。此外,对干制成品的货架期以及复水性还需做相关研究。

2.5 果蔬红外联合干燥关键技术装备研发

在果蔬干燥过程中利用现代化技术装备进行实时监测和控制,以达到最佳干燥效果十分必要^[67-69]。在果蔬红外联合干燥研究成果的基础上,实现干燥设备的技术集成和干燥工艺的智能化控制,提高生产自动化水平,实现工厂规模化应用意义重大。

3 结论及展望

红外联合其他成熟技术主要可用于预处理、灭酶、脱水、冻干、解冻、烤制、烘焙等。将红外辐射加热与其他技术联合进行干燥时,红外穿透物料而获得较多的动能,能缩短果蔬的干燥时间,并在一定程度上提高干制品品质,这为果蔬产业可持续、多元化、健康和创新发展提供了新的解决路径。高效、可连续性进料和出料的智能控制技术及装备研发是果蔬红外联合干燥研究未来发展的方向。

参考文献:

- [1] 王相友,操瑞兵,孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报,2007,38(7):177-182.
- [2] 潘忠礼,Atungulu G G,马海乐,等. 食品和农产品干燥的一种有效方法—红外加热法[J]. 干燥技术与设备,2013(1):61-66.
- [3] Sakai N, Hanzawa T. Applications and advances in far - infrared heating in Japan[J]. Trends in Food Science & Technology,1994,5(11):357-362.
- [4] 卢为开. 远红外辐射加热技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1983.
- [5] Nowak D, Lewicki P P. Quality of infrared dried apple slices[J]. Drying Technology,2005,23(4):831-846.
- [6] Gabel M M, Pan Z L, Amaratunga K, et al. Catalytic infrared dehydration of onions[J]. Journal of Food Science,2006,71(9):351-357.
- [7] Shi J L, Pan Z L, Mchugh T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar - infused blueberries dried with infrared radiation heating[J]. LWT - Food Science and Technology,2008,41(10):1962-1972.
- [8] Shi J L, Pan Z L, Mchugh T H, et al. Effect of berry size and sodium hydroxide pretreatment on the drying characteristics of blueberries under infrared radiation heating food engineering and physical properties [J]. Journal of Food Scienc,2008,73(6):259-264.
- [9] Jezek D, Tripalo B, Brncic M, et al. Dehydration of celery by infrared drying[J]. Croatica Chemica Acta,2008,81(2):325-331.
- [10] Zhu Y, Pan Z L. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry - blanching and dehydration with continuous heating[J]. Journal of Food Engineering,2009,90(4):441-452.
- [11] Zhu Y, Pan Z L, Mchugh T H, et al. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry - blanching and dehydration with intermittent heating[J]. Journal of Food Engineering,2010,97(1):8-16.
- [12] Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices[J]. Journal of Food Science and Technology,2012,49(6):760-766.
- [13] Darvishi H, Najafi G, Hosainpour A, et al. Far - infrared drying characteristics of mushroom [J]. Chemical Product and Process Modeling,2013,8(2):107-117.
- [14] Li X, Pan Z L, Atungulu G G, et al. Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2014,21(1):123-130.
- [15] 尹旭敏,张超,马强,等. 3 种干燥方法对茶树菇干制品品质的影响[J]. 西南农业学报,2013,26(3):1218-1222.
- [16] Xu B G, Zhang M, Bhandari B. Temperature and quality characteristics of infrared radiation - dried kelp at different peak wavelengths [J]. Drying Technology,2014,32(4):437-446.
- [17] Qi L L, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Comparison of drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) using different drying methods[J]. Drying Technology,2014,32(15):1751-1761.
- [18] Azam S M, Roknul, Zhang M, et al. Comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices(*Lactuca sativa* L.) [J]. Drying Technology,2014,32(6):657-666.
- [19] 王俊,许乃章. 远红外与热风联合干燥香菇的研究[J]. 食品与机械,1997(6):18-19.
- [20] Kumar D G, Hebbar H U, Sukumar D, et al. Infrared and hot - air drying of onions[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2005,29(2):132-150.
- [21] 孙传祝,王相友,许云理,等. 不同加热条件下脱水设备与工艺的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(7):95-99.
- [22] 张丽丽,王相友. 红外辐射加热技术在果蔬脱水干燥中的应用研究[J]. 农机化研究,2010(3):193-195.
- [23] 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]. 太谷:山西农业大学,2013.
- [24] Sui Y Q, Yang J H, Ye Q H, et al. Infrared, convective, and sequential infrared and convective drying of wine grape pomace[J]. Drying Technology,2014,32(6):686-694.
- [25] 谢小雷,张春晖,贾伟,等. 连续式中红外 - 热风组合干燥设备的研制与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):282-289.
- [26] 徐刚,顾震,徐建国,等. 胡萝卜热泵 - 远红外联合干燥工艺研究[J]. 食品与发酵工业,2009(6):96-99.
- [27] 王俊,蒋生昕,金红良,等. 微波远红外联合干燥黄桃的试验研究[J]. 浙江农业学报,1999,11(1):27-29.
- [28] 狄建兵,王愈. 不同干燥方法对红枣品质的影响[J]. 农产品加工,2013(9):44.
- [29] 曾目成. 猕猴桃片新型联合干燥技术研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
- [30] Motevali A, Minaei S, Khoshtaghaza M H, et al. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices [J]. Energy,2011,36(11):6433-6441.
- [31] Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of Welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. Journal of Food Engineering,2002,55(2):147-156.
- [32] 胡洁. 果蔬远红外真空干燥技术研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
- [33] 徐凤英,李长友,陈震. 荔枝真空远红外辐射过热干燥的特性[J]. 华中农业大学学报,2009,28(4):495-499.
- [34] Liu Y H, Zhu W X, Luo L, et al. A mathematical model for vacuum far - infrared drying of potato slices[J]. Drying Technology,2014,32(2):180-189.
- [35] Lin Y P, Tsen J H, King V. Effects of far - infrared radiation on the freeze - drying of sweet potato[J]. Journal of Food Engineering,2005,68(2):249-255.
- [36] Shih C, Pan Z, Mchugh T, et al. Sequential infrared radiation and freeze - drying method for producing crispy strawberries[J]. Transactions of the ASABE,2008,51(1):205-216.
- [37] Pan Z L, Shih C, Mchugh T H, et al. Study of banana dehydration

- using sequential infrared radiation heating and freeze – drying [J]. LWT – Food Science and Technology, 2008, 41 (10) : 1944 – 1951.
- [38] Kocabiyik H, Tezer D. Drying of carrot slices using infrared radiation [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44 (5) : 953 – 959.
- [39] Jaturonglumlert S, Kiatsirirot T. Heat and mass transfer in combined convective and far – infrared drying of fruit leather [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100 (2) : 254 – 260.
- [40] 巨浩羽, 肖红伟, 白竣文, 等. 苹果片的中短波红外干燥特性和色泽变化研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44 (增刊 2) : 186 – 191.
- [41] 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (1) : 262 – 269.
- [42] 李兆路, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 桑椹对流 – 红外联合干燥特性及品质变化研究 [J]. 现代食品科技, 2015, 31 (1) : 166 – 172.
- [43] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 中短波红外和热风干燥对番木瓜干燥特性及品质的比较 [J]. 现代食品科技, 2015, 31 (2) : 190 – 195, 172.
- [44] Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, et al. Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low – pressure superheated steam and far – infrared radiation drying [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (14/15) : 2483 – 2494.
- [45] Dondee S, Meeso N, Soponronnarit S, et al. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near – infrared radiation and fluidized – bed drying [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104 (1) : 6 – 13.
- [46] Rastogi N K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52 (9) : 737 – 760.
- [47] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (5) : 317 – 324.
- [48] 张卫鹏, 肖红伟, 高振江, 等. 中短波红外联合气体射流干燥提高茯苓品质 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (10) : 269 – 276.
- [49] 白竣文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (16) : 278 – 285.
- [50] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (增刊 1) : 382 – 388.
- [51] Xiao H W, Yao X D, Lin H, et al. Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices [J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35 (3) : 370 – 390.
- [52] Xiao H W, Law C L, Sun D W, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying [J]. Drying Technology, 2014, 32 (4) : 418 – 427.
- [53] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (1) : 276 – 281.
- [54] Xiao H W, Lin H, Yao X D, et al. Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying [J]. International Journal of Food Engineering, 2009, 5 (5) : 1556 – 3758.
- [55] Bai J W, Gao Z J, Xiao H W, et al. Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of Fuji apple quarters by high humidity air impingement blanching [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48 (6) : 1135 – 1141.
- [56] Xiao H W, Pang C L, Wang L H, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air – impingement jet dryer [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105 (2) : 233 – 240.
- [57] 杨文侠, 高振江, 谭红梅, 等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄及品质分析 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (4) : 237 – 242.
- [58] 王丽红, 高振江, 肖红伟, 等. 圣女果的气体射流冲击干燥动力学 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2011, 32 (5) : 540 – 544.
- [59] Xiao H W, Gao Z J, Lin H, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes [J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33 : 899 – 918.
- [60] 谢龙, 童军茂, 高振江, 等. 高温高湿气体射流冲击烫漂对红枣品质影响 [J]. 食品工业, 2013, 34 (6) : 144 – 148.
- [61] Zhao J H, Liu F, Wen X, et al. State diagram for freeze – dried mango: freezing curve, glass transition line and maximal – freeze – concentration condition [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 157 : 49 – 56.
- [62] Zhao J H, Hu R, Xiao H W, et al. Osmotic dehydration pretreatment for improving the quality attributes of frozen mango: effects of different osmotic solutes and concentrations on the samples [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49 (4) : 960 – 968.
- [63] 肖红伟, 高振江. 干燥对玉米饲用和加工品质影响的研究进展 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (7) : 290 – 295.
- [64] Xiao H W, Bai J W, Xie L, et al. Thin – layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered [J]. Food and Bioprocess Engineering, 2015, 94 (2) : 581 – 591.
- [65] Dai J W, Rao J Q, Wang D, et al. Process – based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves [J]. Drying Technology, 2015, 33 (3) : 365 – 376.
- [66] 娄正, 高振江, 肖红伟, 等. 板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (11) : 368 – 373.
- [67] 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.
- [68] 王栋, 林海, 姚雪东, 等. 基于 MODBUS 协议的干燥控制系统设计 [J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2012, 30 (1) : 110 – 115.
- [69] 王栋, 林海, 肖红伟, 等. 气体射流冲击干燥含水率在线监控系统设计 [J]. 农业工程学报, 2014, 30 (19) : 316 – 324.