

果蔬联合干燥技术的研究进展

郑亚琴,石启龙*,赵亚

(山东理工大学农业工程与食品科学学院,山东淄博 255049)

摘要:介绍了联合干燥的定义和技术特点,综述了果蔬联合干燥的国内外研究进展,探讨了该技术存在的不足和未来发展方向,并对其在果蔬干燥中的应用前景进行了展望。

关键词:果蔬,联合干燥,进展

Research development of combination drying for fruits and vegetables

ZHENG Ya-qin, SHI Qi-long*, ZHAO Ya

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: This work introduced the definition and technical traits of hybrid drying, then summarized the current development of combination drying for fruits and vegetables at home and abroad. Finally, the existing problems, future development trend and prospect of its application in fruits and vegetables drying were also discussed.

Key words: fruits and vegetables; combination drying; development

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)12-0438-05

果品、蔬菜是仅次于粮食的世界第二重要农产品,是人类摄取维生素、矿物质、有机酸、膳食纤维等营养成分或生理活性成分的主要来源,其消费在现代平衡膳食理念中占有非常重要的地位^[1]。我国加入WTO后,果蔬业具备非常明显的优势和国际竞争力。2010年,我国果品和蔬菜总产量分别达到1亿t和6亿t。但是由于果蔬含水率较高,质脆易腐以及生产的季节性、区域性,出现了果蔬在时间上和空间上的相对过剩,滞销跌价,腐烂损耗率高,各地丰产不丰收等现象。这不仅制约了果蔬产业的可持续发展,而且造成采后的巨大损失,导致新鲜果蔬每年损耗率较高,水果达到30%,蔬菜达到40%~50%,价值约750亿元人民币。因此,大力发展果蔬精深加工业是解决这一问题的重要途径。我国是脱水果蔬生产、出口的大国,出口总量占世界脱水果蔬贸易总额的40%。但是传统的干燥工艺能耗较高、质量差,导致国际竞争能力下降,而且干燥能耗较高一直是制约干燥业发展的瓶颈。随着食品干燥业的发展,单一的干燥模式显露出种种缺陷,不能满足人们的要求。低能耗、高品质的联合干燥技术应运而生。联合干燥是指根据物料的特性,将2种或2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。近年来,联合干燥由于在提高干燥速率、降低过程能耗、提高产品质量方面具有独特的优势,因而受到国内外学者、企业界、工业界的广泛关注^[2-3]。本文就联合干燥的国内外研究现状、存在

问题及未来发展方向进行了综述,以期“优质、低能耗、高效”联合干燥技术在脱水果蔬上的应用提供理论参考。

1 国内外果蔬联合干燥技术的研究现状

1.1 微波-热风(真空干燥,冷冻干燥)联合干燥

微波干燥(Microwave drying, MD)具有热效率高、干燥速度快、加热均匀、无污染等优点。MD最大缺陷之一是加热过程中温度的不均匀性,从而导致产品品质不佳。干燥初期物料含水率高,吸收微波能多,产品极易出现破损现象(尤其是微波功率较高时),而且微波功率超过500W时会产生放电现象^[2]。国内外学者在MD与其它干燥方式联合应用于果蔬干燥方面进行了大量研究。余莉等^[4]对微波(MW)-对流联合干燥的工作机理进行了定性分析,建立了相应的数学模型和微分控制方程组,并在此基础上对球形物料的MW-对流联合干燥特性进行了数值模拟,着重考察了沿半径方向上物料含水量、水蒸汽压力、温度等随干燥时间的变化关系,计算结果符合理论分析情况,与实验结果吻合良好。同时发现,微波输入功率对内部湿度的迁移、干燥过程的温度变化都有很大的影响。Varith等^[5]对去皮龙眼进行了MW-热风(HA)联合干燥研究,结果表明,MW-HA联合干燥工艺使干燥时间缩短了64.3%,单位能耗降低了48.2%。Karaaslan等^[6]探讨了微波功率、干燥温度对菠菜MW-对流联合干燥时间、干燥比和颜色变化的影响,并采用11种常见的数学模型拟合实验数据,结果发现,较高的功率和温度能缩短干燥时间,Midilli-Kucuk模型能较好地描述菠菜的MW-对流干燥过程。章斌等^[7]研究结果表明,香蕉片HA-MW联合干燥方式的干燥速率快、能耗低、产品品质与冷冻干燥(FD)的产品相近;HA-MW联合干

收稿日期:2011-08-26 *通讯联系人

作者简介:郑亚琴(1987-),女,硕士生,研究方向:食品干燥理论与技术。

基金项目:国家自然科学基金项目(31171708)。

燥最佳工艺条件:热风温度 65℃, 风速 2.4m/s, 转换点含水率 55%, 微波功率 200W。钟成义等^[8]研究了不同微波强度、微波处理时间、热风温度、热风干燥 (HAD) 时间对枸杞子 MW-HA 联合干燥的干燥速度与外型效果的影响。结果表明, 采用较大微波功率有助于枸杞子迅速升温, 迅速钝化枸杞子中的活性酶, 有利于稳定成品枸杞子的品质, 但大功率微波处理枸杞子, 处理时间必须适度, 否则容易造成枸杞子破裂, 影响产品品质。枸杞子联合干燥的最佳参数组合:微波处理 6min 左右, 迅速转入 HAD, 40~45℃ 干燥 6h, 再用 65℃ 干燥 15h, 可以获得品质较好的枸杞子。石启龙等^[9]确定了牛蒡 HA-MW 联合干燥的最优工艺参数:牛蒡厚度 3mm, 热风干燥温度 75℃, 转换点含水率 70%, 微波输出功率 360W。石启龙等^[10]研究了雪莲果的热风、微波干燥特性并确定了 HA-MW 联合干燥的最适工艺参数:热风温度 68.1℃, 转换点含水率 61.0%, 微波质量比功率 2.6W/g。在此组合参数条件下, 雪莲果干燥前后色泽变化 21.53, 干燥时间 172min, 复水比 4.12, 收缩率 84.35%。

Cui 等^[11]研究了胡萝卜片的 MW-真空干燥 (VD) 动力学, 建立了胡萝卜片薄层干燥的数学模型, 发现理论模型和实验数据吻合较好, 当干基含水率 (X_s) 达到 2 时出现恒速干燥阶段; 当 $1 \leq X_s < 2$ 时, 实验干燥曲线与理论曲线有很小的偏差, 而当 $X_s < 1$ 时, 则出现了大的偏差, 为了更好地描述 $X_s < 2$ 阶段含水率随时间的变化, 通过非线性回归分析得到了修正因子 ψ 。姜元欣^[12]得到了南瓜渣 MW-VD 最佳干燥条件:功率 668.37W, 压强 4kPa, β -胡萝卜素的保留率达到 92.31%, 干燥时间 60min。此外, 可用 Page 模型来描述南瓜渣 MW-VD 的动力学。Therdthai 等^[13]研究表明, 与薄荷叶 HAD 相比, MW-VD 能减少 85%~90% 的干燥时间, 而且具有色泽变化小、有多孔而均一的微观结构、复水速率较高等优点。

段续等^[14]研究表明, 微波辅助冷冻干燥 (MFD) 海参和 FD 海参在质量上无显著差异, MFD 干燥时间比 FD 缩短近 1 倍, 能耗可降低 30%~40%, MFD 可完全代替 FD, 并可获得高品质的海参干制品。但 MFD 在果蔬干燥中应用还未见报道, 具有非常广阔的开发和应用前景。

1.2 微波真空-热风(真空干燥, 冷冻干燥)联合干燥

微波真空干燥 (Microwave vacuum drying, MVD) 作为一个干燥单元与其它干燥方式联合, 应用于果蔬干燥具有广阔的应用前景。李瑜等^[15-16]探讨了 HAD、VD、FD、MVD-VD 对大蒜中硫代亚磺酸酯保留率和品质的影响, 确定了大蒜 MVD-VD 的最佳工艺:376.1W、3min, 282.1W、3min, 188.0W、9min, 94W、3min, 硫代亚磺酸酯保留率 90.2%。在最佳工艺条件下得到了与冻干质量相似的产品。

Hu 等^[17]确定了日本毛豆 HA-MVD 最佳工艺:70℃ 热风干燥 20min, 然后在压力 95kPa、微波功率

9.33W/g 下干燥 15min。此干燥工艺与 HAD 相比, 增加了干燥速率、缩短了干燥时间、提高了产品质量。黄建立等^[18]以银耳的收缩率、复水比、感官质量以及单位能耗为评价指标, 研究热风温度、转换点含水率及微波强度等因素对银耳品质以及干燥能耗的影响; 并将较佳的 HA-MVD 与 HA 以及 MVD 进行比较。结果表明, 采用前期 HAD 温度 70℃, 转换点含水率 30%, 后期微波强度 5W/g 的联合干燥工艺, 可获得品质较佳的银耳干品, 且单位能耗较低。

于华宁等^[19]以黑加仑为原料, 对其进行了 FD-MVD 联合干燥工艺的研究。结果表明, 先 FD 后 MVD 的组合方式是可行的, 联合干燥合理工艺参数:微波功率 1.34kW, 绝对压力 11kPa, 转换点含水率 20% (w.b.), 通过实验验证, 联合干燥生产的脱水黑加仑的感官品质和营养成分接近 FD, 干燥时间比 FD 节省了 6.3%, 能耗降低了 29.2%。黄略略等^[20]采用 MVD-FD 联合干燥草莓, 既减少了草莓单纯 FD 中的高能耗, 同时也很好地保持了产品的质量。MVD 最佳功率为 2W/g; FD 11.5h + MVD 的联合干燥能够得到外观最好的草莓, 且无效能耗节约率为 28.19%; 而 FD 7h + VMD 的联合干燥可使无效能耗节约 50.28%, 虽然没有最好的外观, 但其产品仍然可被消费者接受。

1.3 冷冻干燥-热风(真空微波)联合干燥

冷冻干燥 (Freeze drying, FD) 又称升华干燥, 是将含水物料冷冻到冰点以下, 使水转变为冰, 然后在较高真空下将冰转变为蒸气而除去的干燥方法。FD 非常适用于热敏性物料的干燥, 产品质量高, 但是 FD 设备投资大、干燥过程中能耗较高是限制该技术进一步发展的瓶颈。因此, 切实加强基础理论研究, 在确保食品质量的同时, 实现节能、降耗, 是 FD 技术领域面临的最主要问题。联合干燥是解决这一问题的主要途径之一, 国内外也进行了相关的研究。徐艳阳等^[21-22]对草莓、毛竹笋进行了 FD-HAD 联合干燥研究, 确定了联合干燥的最佳工艺参数组合, 联合干燥产品在质量方面明显优于 HAD 产品, 接近 FD 产品, 而且能耗与 FD 相比显著降低。

李瑞杰等^[23]以草莓为原料, 采用 FD 与后续 MVD 联合干燥的方式开发出一种休闲食品。联合干燥的转换点含水率为 37%, 后续 MVD 条件为:真空度 0.095MPa, 微波功率为 2.1kW, 干燥时间 40min。FD-MVD 联合干燥的脱水草莓品质接近完全 FD 的草莓, 干燥时间缩短了 51%, 大大降低了能耗, 而且产品口感得到了一定程度的改善。

1.4 远红外-热风(真空干燥、微波干燥)联合干燥

远红外线 (Far-infrared radiation, FIR) 干燥又称辐射干燥, 是指利用远红外线辐射使干燥物料中的水分汽化的干燥方法。相比于传统的 HAD, 辐射干燥具有干燥速率快、干燥质量好、能量利用率高等优点^[24]。Praveen Kumar 等^[25]研究发现, 修正的 Page 模型能更好地预测洋葱片的 FIR-HA 干燥进程。Nathakaranakule 等^[26]对龙眼进行了远红外辅助热风干燥、远红外辅助热泵干燥研究。结果表明, 远红外

辅助干燥处理能显著提高干燥速率,而且远红外处理有助于龙眼干制品多孔结构的形成,产品的收缩率降低、产品硬度和韧性降低、复水率提高。此外,远红外辅助干燥的龙眼干制品外观呈深红色。远红外辅助干燥系统总能耗随着远红外加热功率的增加而降低,但不显著。Ponkham 等^[27]对环形菠萝片进行了 FIR-HA 联合干燥研究。结果发现,扩散系数主要受远红外强度和热风温度的影响,考虑干制品收缩时的水分扩散系数要低于不考虑干制品收缩时的数值;相比于其它 3 种多项式模型,4 次方模型能更好地描述干燥过程中的色泽变化;修正的 Midilli-Kucuk 模型能很好地预测菠萝片干制品的剪切力比;二次模型能较好地描述菠萝片干燥过程中的收缩动力学。

Swasdisevi 等^[28]对香蕉片进行了 FIR-VD 联合干燥研究,通过对联合干燥过程中含水率和温度的预测值与实验值对比,表明所建立的数学模型完全能够描述联合干燥过程中含水率及温度的变化。

王俊等^[29]采用 MW-FIR 联合干燥黄桃,探讨了各参数对干燥速率、电耗和干燥质量的影响,得到 MW-FIR 联合干燥的最优工艺参数:FIR 干燥箱温 62.3℃,微波干燥功率 0.5W/g,FIR 转换成 MW 时黄桃含水率 58.78%;采用 MW-FIR 联合干燥黄桃,远优于单独采用 FIR 干燥,干后质量略优于单独采用 MD。Wang 等^[30]研究了桃子的 FIR-MW 干燥特性,结果表明,脱水速率随着 MW 和 FIR 功率增加而增加,干燥能耗减少;干燥过程出现了 2 个降速阶段,第 1 个降速阶段出现在 $X_s > 1.7$,第 2 个降速阶段则在 $X_s < 1.7$ 时;远红外功率、微波功率和转换点含水率对能耗率和产品感官质量有显著影响,远红外功率与转换点含水率的交互作用对二者的影响显著,而远红外功率的二次项、远红外和微波功率的交互作用对能耗率无显著影响,转换点含水率与微波功率的交互作用对感官质量也无显著影响。

1.5 渗透脱水-热风(微波干燥)联合干燥

渗透脱水(Osmotic dehydration, OD)可以在较短的时间内除去果蔬中的水分而不损坏其组织结构,经过 OD 的产品仍具有原果蔬应有的风味、色泽、质构、营养及感官品质。此外,OD 也可以作为果蔬加工的一种前处理方式,与干燥、冷冻、杀菌、罐藏等方法组合使用,因此得到了国内外食品界的广泛关注^[2,31]。由于 OD 仅靠细胞膜两端的渗透压差来促进传质,所以静止的 OD 是个比较缓慢的过程,为了加速 OD 过程中固-液传递,高静水压、高压脉冲、超临界 CO₂、超声波、真空、微波加热、离心等高新技术应用在果蔬渗透脱水中,对提高物质迁移速率取得了显著进展^[32]。

国内一些学者对部分果蔬进行了 OD 及后续干燥研究,结果发现,OD 辅助干燥能提高干燥速率、缩短干燥时间、提高干制品品质(如营养、色泽、复水性等)^[33-36]。Botha 等^[37]以 OD 时间、微波功率、HAD 温度和风速为实验因素,以表面碳化率、含水率、可溶性物含量、水分活度(a_w)、硬度、颜色、体积为实验指

标,研究了 OD 与 MW-HAD 联合处理对菠萝干制品质量的影响。结果表明,OD 对产品体积和外观没有明显影响,但是与未经 OD 处理比较,经过 OD 的产品质量有所提高。微波功率和热风温度是影响产品质量尤其是含水率和表面碳化率的最主要因素。除了干燥后期略有交互作用外,所有的因素对指标均为线性影响。微波功率和热风温度对表面碳化率有显著的交互作用,经过验证的二次模型可以用来显示各种目标下的最优条件。

OD 辅助干燥工业化应用时,亟待解决的问题是渗透溶液的在线管理,如溶液浓度的控制、溶液的回收、渗透液的微生物的安全性等,而且对于 OD 后的后续联合干燥技术,有待进一步深入研究^[34]。

1.6 低压过热蒸汽-远红外联合干燥

近年来,过热蒸汽干燥(Superheated steam drying, SSD)已成功地应用于诸多食品的干燥,但是 SSD 应用于热敏性食品如果蔬干燥存在一些缺陷,这主要是由于温度过高导致。因此,低压过热蒸汽干燥(Low pressure superheated steam drying, LPSSD)在食品工业中得到了应用,在压力降低的情况下,温度低于 100℃ 就可以产生所需的蒸汽,所以对于由高温引起的质量恶化情况得到改善,LPSSD 的产品质量优于传统 HAD 和 VD。但是,LPSSD 速率慢、能耗大,将其与 FIR 干燥结合起来可以有效地解决这一问题。Nimmol 等^[38-39]研究了 LPSSD-FIR 时介质温度、压力对干燥动力学和香蕉质量(色泽、收缩性、复水性、微观结构、质构)的影响,同时对 VD-FIR 与 LPSSD 进行了比较,结果发现,与 LPSSD 相比,VD-FIR 和 LPSSD-FIR 能缩短干燥时间,且干燥过程中的比能耗降低。LPSSD-FIR 联合干燥香蕉片的最适工艺条件为:80~90℃、7kPa。

1.7 热泵-热风(远红外干燥,微波干燥)联合干燥

热泵干燥(Heat pump drying, HPD)具有能耗低、干燥效率高、不依赖外界环境、条件易于控制及环境友好等优点,且整个干燥系统处于密闭状态,可以避免或减轻果蔬酶促褐变和营养成分损失。Pal 等^[40]对 HPD 的工作原理及其在食品中的应用进行了综述。HPD 存在的主要问题是干燥中、后期干燥速率小和能耗比升高。因此,将 HPD 与其它干燥方式联合,扬长避短,是解决这一问题的主要途径。目前,国内外关于果蔬 HPD 方面的研究较多,但是 HPD 与其他干燥技术联合方面研究较少。徐建国等^[41]采用 HPD-HA 联合干燥胡萝卜片,对干燥温度和空气速度等参数进行了探索,研究了干燥过程的特征,确定了前期低温 HPD、后期短时 HAD 的联合干燥方式,通过修正的单项指数模型和 page 方程来分段模拟联合干燥过程。HPD-HA 联合干燥显著缩短了热泵干燥时间的同时,最大程度地降低了 HAD 对物料有效成分的破坏,提高了干制品品质。成刚^[42]以 HPD 温度、转换点含水率、后期 HAD 温度为影响因素,以单位能耗除湿量(Specific moisture extraction rate, SMER)值和叶绿素含量两者的综合指标为最终评价指标进行响应面优化分析,得出甘蓝联合干燥最佳

工艺参数:HPD 温度 57.2℃、转换点含水率 26.4% 和 HAD 温度 54.5℃。在最优工艺条件下比较 HPD、HPD + HAD、HAD 等 3 种干燥方式下的样品品质和耗能,除叶绿素含量外,联合干燥所得脱水甘蓝品质好于 HAD,而且干燥耗能降低了 40.67%。此外,还确定了大葱先冷冻干燥后热泵干燥(FD + HPD)的联合干燥方式,并确定了联合干燥最佳工艺参数:真空冷冻干燥温度 61.1℃、转换点含水率 36.5% 和 HPD 温度 57.4℃。联合干燥下得到的大葱成品外观上接近于 FD,而且干燥耗能降低了 55.08%,但除了总酸外,营养指标和复水比与 FD 大葱成品还存在差距,需要做进一步的深入研究。

徐刚等^[43]对胡萝卜片进行了 HPD-FIR 联合干燥工艺研究,探讨了预处理工艺、HPD 温度、FIR 辐射强度及联合干燥时间转换点对干燥速度、干燥能耗和类胡萝卜素损失率的影响。确定了胡萝卜 HPD-FIR 联合干燥工艺最佳工艺参数:物料热烫时间 120s,HPD 温度 45℃,FIR 热源辐射功率为 2kW,HPD 与 FIR 转换点的物料含水率为 50%。

关志强等^[44]对整果荔枝进行了 HPD-MD 联合干燥工艺研究,结果表明,影响荔枝干品品质因素的大小顺序为 HPD 温度 > HPD-MD 转换点干基含水率 > MD 时间;最优工艺参数组合为 HPD 温度 50℃、HPD-MD 转换点干基含水率 100%、MD 干燥时间 2.5min。在此组合参数条件下,感官综合得分为最高分 27。

解决能源危机的重要手段之一是利用丰富的太阳能。我国太阳能资源丰富,且太阳能具有廉价、节能、环保等优点,如何有效利用太阳能具有重大意义。太阳能与 HPD 联合干燥目前在木材干燥上研究较多,而在果蔬干燥上研究较少,具有非常广阔的开发、利用前景。此外,其它新型干燥技术,如变温压差膨化干燥(Explosion puffing drying)、气体射流冲击干燥(Air-impingement drying)等与其它干燥技术的联合(串联或并联)干燥也具有非常广阔的开发及应用前景。

2 联合干燥技术存在的不足与未来发展方向

2.1 存在的不足

2.1.1 研究内容的局限性 目前联合干燥研究多偏重提高干燥速率、缩短干燥时间等方面,而对干燥过程的模型、模拟,干燥过程的传热、传质机理,主要营养成分质量降解动力学模型以及干制品最适贮藏条件研究较少。

2.1.2 工业化生产的欠规模性 由于联合干燥涉及设备的改造组装、技术线路是否成熟等各种问题,技术尚处于理论研究阶段,投入到实际生产中的很少。所以,要形成规模化生产还需要较长时间。

2.2 未来发展方向

2.2.1 进一步完善干燥理论 联合干燥相关理论需进一步完善,包括如下几个方面:a.干燥过程模型、模拟,干燥过程的传热、传质机理;b.联合干燥工艺条件的确定,尤其是转换点含水率的合理确定,需根据物料干燥特性及干制品品质变化综合考虑;c.食品主要

营养成分干燥过程中降解动力学模型研究;d.干燥的重要目的之一就是保藏,近年来, a_w 作为评估食品安全贮藏标准的局限性越来越受到学者们的重视。因此,提出了玻璃化转变(glass transition)概念。玻璃化转变理论的最大应用是状态图(state diagrams),而分子流动性(molecular mobility, M_m)、状态图又与食品加工及贮藏稳定性有密切的关系。因此,如何将干燥工艺优化、干制品贮藏稳定性与玻璃化转变理论相结合,是将来干燥业的一个重要发展方向。

2.2.2 技术的一体化和设备的自动化 干燥理论研究必将带动干燥设备的不断改进,易于控制、自动化控制、安全操作、在线精确检测将成为干燥设备未来的发展方向。

2.2.3 新能源开发利用 能源是经济社会发展和提高人民生活水平的重要物质基础,我国的能源和环境问题与国民经济可持续发展的矛盾日益突出^[45]。干燥本身是个耗能较大的过程,其能耗约占工业总能耗的 10%~15%^[10]。而且干燥过程造成的污染又常常是我国环境污染的重要来源^[46]。因此,在当前能源资源短缺、价格不断上涨的形势下,干燥技术的节能、环保问题显得尤为重要。干燥技术发展趋势将沿着高效节能、绿色环保、优质方向发展,必将推进新能源的开发利用,如太阳能干燥、HPD 等技术将具有非常广阔的开发及应用前景。此外,常规干燥排气热能的回收也是节能、环保干燥技术亟需解决的问题。

2.2.4 加强干燥理论与工业应用的结合 目前,国内外许多干燥理论与工业应用脱节,陷入了“理论研究-发表论文-再研究-再发表论文”的怪圈,最终失去应用价值^[3,46]。因此,应加强科研院所与干燥企业的交流、合作,推动产学研的结合,使更多的科研成果转化成生产力。

3 结论

联合干燥使各种干燥技术扬长补短,从而达到优质、低能耗、高效等目的,符合国家“节能、减排”政策要求,对果蔬干燥技术的发展有着重要的理论价值和现实意义。同时,对于繁荣经济、调整农业产业结构和解决“三农”问题都有着重要的作用,以有效利用能源、提高产品质量、操作安全、易于控制为方向,联合干燥技术在理论上和应用上将得到更多完善,具有非常广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 张慜,徐艳阳,孙金才.国内外果蔬联合干燥的研究进展[J].无锡轻工大学学报,2003,22(6):103-106.
- [2] Zhang M, Tang J, Mujumdar A S, et al. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables [J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(10):524-534.
- [3] 张慜.生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [4] 余莉,明晓,蒋彦龙.微波对流联合干燥特性的数值模拟[J].重庆大学学报:自然科学版,2005,28(1):135-139.
- [5] Variht J, Dijkarukkul P, Achariyaviriya A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan [J]. Journal of Food

- Engineering, 2007, 81: 459-468.
- [6] Karaaslan S N, Tuncer I K. Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100: 44-52.
- [7] 章斌, 侯小楨. 热风与微波联合干燥香蕉片的工艺研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 97-99, 142.
- [8] 钟成义, 肖宏儒, 秦广明. 枸杞子微波热风联合干燥技术研究[J]. 农业装备技术, 2010, 36(4): 10-13.
- [9] 石启龙, 赵亚, 王锡海. 热风微波联合干燥牛蒡的实验研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 320-322.
- [10] 石启龙, 赵亚, 郑亚琴. 雪莲果热风-微波联合干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2011, 32(12): 150-155.
- [11] Cui Z W, Xu S Y, Sun D W. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65: 157-164.
- [12] 姜元欣. 微波真空干燥南瓜渣和南瓜粉[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [13] Therdthai N, Zhou W B. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91: 482-489.
- [14] Duan X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96: 491-497.
- [15] 李瑜, 许时婴. 大蒜干燥工艺的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(6): 54-58.
- [16] Li Y, Xu S Y, Sun D W. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83: 76-83.
- [17] Hu Q G, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77: 977-982.
- [18] 黄建立, 黄艳, 郑宝东, 等. 银耳热风-微波真空联合干燥工艺优化的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 88-91.
- [19] 于华宁, 郑先哲, 贾暑花, 等. 黑加仑真空冷冻与微波真空联合干燥工艺研究[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(5): 235-241.
- [20] 黄略略, 张懋. 草莓冻干-真空微波联合干燥节能保质研究[J]. 干燥技术与设备, 2010, 8(3): 105-111.
- [21] 徐艳阳, 张懋, 孙金才, 等. 真空冷冻与热风联合干燥草莓[J]. 无锡轻工大学学报, 2005, 24(1): 45-48.
- [22] 徐艳阳. 毛竹笋真空冷冻与热风联合干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- [23] 李瑞杰, 张懋, 孙金才. 冷冻干燥与后续真空微波联合干燥开发草莓休闲食品[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(4): 456-461.
- [24] 曾名湧. 食品保藏原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [25] Praveen Kumar D G, Umesh Hebbar H, Ramesh M N. Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices [J]. LWT, 2006, 39: 700-705.
- [26] Nathakaranakule A, Jaiboon P, Soponronnarit S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100: 662-668.
- [27] Ponkham K, Meeso N, Soponronnarit S, et al. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, doi: 10.1016/j.fbp.2011.02.008.
- [28] Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-Adchom P, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92: 100-106.
- [29] 王俊, 蒋生昕, 金红良, 等. 微波远红外联合干燥黄桃的实验研究[J]. 浙江农业学报, 1999, 11(1): 26-28.
- [30] Wang J, Sheng K C. Far-infrared and microwave drying of peach [J]. LWT, 2006, 39: 247-255.
- [31] 石启龙, 赵亚, 郑亚琴. 雪莲果超声波辅助渗透脱水工艺参数的优化[J]. 食品科学, 2011, 32(12): 124-129.
- [32] Sagar V R, Suresh K P. Recent advantages in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. [J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(1): 15-26.
- [33] 田红萍. 胡萝卜渗透脱水和微波干燥组合实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [34] 董全. 蓝莓渗透脱水和流化床干燥的研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [35] 王维琴. 高压脉冲电场预处理对农产品渗透脱水和热风干燥的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [36] 程璐. 莴笋渗透脱水及其复合干燥的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [37] Botha G E, Oliveira J C, Ahrné L. Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, doi: 10.1016/j.fbp.2011.02.006.
- [38] Nimmol C, Devahastin S, Swasdisevi T, et al. Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 624-633.
- [39] 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: 2483-2494.
- [40] Pal U S, Khan M K. Heat pump drying of food materials: A critical review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 44(2): 119-124.
- [41] 徐建国, 李华栋, 徐刚, 等. 胡萝卜片热泵-热风联合干燥特性与模型化研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(11): 145-148.
- [42] 成刚. 蔬菜热泵型联合干燥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [43] 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, 35(6): 96-99.
- [44] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 热泵-微波联合干燥整果荔枝工艺研究[J]. 食品科学, 2011, 32(6): 20-24.
- [45] 许彩霞, 张壁光, 伊松林, 等. 太阳能与热泵联合干燥木材特性的实验研究[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(4): 184-189.
- [46] 张壁光, 谢拥群. 国际干燥技术的最新研究动态与发展趋势[J]. 木材工业, 2008, 22(2): 5-7.