

刘静, 赵亚, 石启龙. 果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究进展及未来展望 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 32–42. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110103

LIU Jing, ZHAO Ya, SHI Qilong. Research Progress and Future Prospects of Novel Pretreatment Technologies for the Drying of Fruits and Vegetables and Aquatic Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 32–42. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110103

· 未来食品 ·

果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究 进展及未来展望

刘 静, 赵 亚, 石启龙*

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255000)

摘 要: 果蔬和水产品营养价值丰富, 但含水率较高, 极易引起微生物生长繁殖, 进而导致腐败变质。干燥是延长果蔬和水产品货架期的有效途径, 但干燥时间长、干制品品质差是限制该领域发展的瓶颈问题。采用热力或非热力预处理可有效提高干燥效率, 改善干制品品质。基于此, 本文综述了果蔬和水产品新型烫漂(高温气体射流冲击烫漂、红外辐射烫漂、微波烫漂、射频烫漂)和非热力(可食性成膜、超声波、脉冲电场、低温等离子体)预处理技术的研究进展, 并对其在果蔬和水产品干燥中的应用前景进行了展望, 对果蔬和水产品的干燥具有重要的指导意义。

关键词: 果蔬, 水产品, 新型预处理, 干燥效率, 品质特性

中图分类号: TS205.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)10-0032-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110103



本文网刊:

Research Progress and Future Prospects of Novel Pretreatment Technologies for the Drying of Fruits and Vegetables and Aquatic Products

LIU Jing, ZHAO Ya, SHI Qilong*

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Fruits and vegetables and aquatic products have rich nutritional value. However, they are susceptible to spoilage due to high moisture content and excellent habitat for microbial growth. Drying is an effective way to extend the shelf life of fruits and vegetables and aquatic products. However, longer drying time and poor quality properties of dried products are the bottle neck that restrict the development of drying field. Thermal or non-thermal pretreatment technologies are employed to accelerate drying efficiency and enhance quality properties of dried products. Based on this, the research progress of novel blanching technologies (high humidity hot air impingement blanching, infrared blanching, microwave blanching, and radio frequency blanching) and non-thermal (edible coating, ultrasound, pulsed electric field, and cold plasma) pretreatments and their application prospects in the drying of fruits and vegetables and aquatic products are reviewed in this paper. This review would be of vital guiding significance for the drying of fruits and vegetables and aquatic products.

Key words: fruits and vegetables; aquatic products; novel pretreatment; drying efficiency; quality properties

果蔬和水产品营养价值丰富, 但含水率高, 微生物极易生长繁殖, 造成腐败变质。采用干燥方式可除

去物料中的水分, 降低水分活度, 延长其货架期^[1]。传统干燥方式(如日光干燥和热风干燥)普遍在高温

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MC215); 山东理工大学-沂源县产业技术研究院科技项目支持计划(3221005)。

作者简介: 刘静(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品干燥理论与技术, E-mail: liujing20165296@163.com。

* 通信作者: 石启龙(1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬/水产品加工与贮藏, E-mail: qilongshi@sdu.edu.cn。

条件下进行,不仅能耗高、效率低,而且极易发生营养成分降解、脂质氧化和蛋白质变性等现象,导致干制品品质下降^[2]。降低干燥介质温度是缓解这一问题的有效方法,但干燥效率显著降低^[2]。因此,如何在降低干燥介质温度的同时,提升干燥效率和改善干制品品质,成为果蔬和水产品干燥领域的重点和难点。作为一种有效提升干燥效率、改善干制品品质的方法,预处理被广泛应用于食品干燥领域。

预处理是利用物理、化学和/或生物等技术在干燥前对物料进行处理,通过改变物料组织结构达到强化干燥速率、保留营养物质、延长货架期和保持产品良好外观等目的^[2]。预处理可以有效解决食品干燥时间长、干制品品质差等问题^[2-4]。按照处理方式,干燥预处理可分为热力预处理和非热力预处理 2 类。传统干燥预处理方式包括热水烫漂(hot water blanching, HWB)和化学预处理(亚硫酸盐、酸/碱液、高渗透压溶液等),但存在各自弊端。例如: HWB 预处理容易导致营养物质损失;化学预处理存在试剂残留带来的安全隐患问题^[4]。近年来,高湿气体射流冲击(high humidity hot air impingement, HHAIB)、红外辐射(infrared radiation, IR)、射频(radio frequency, RF)、微波(microwave, MW)、欧姆加热(ohmic heating, OH)等新型技术有取代传统烫漂方式的趋势,而且在抑制微生物和钝化酶等方面展示出良好的效果。此外,新型非热力预处理因其强化干燥效率效果显著、营养物质保留率高、无有害化学试剂残留等优点,在食品干燥预处理领域崭露头角,展示出巨大潜力。新型非热力干燥预处理方式主要包括:可食性成膜(edible coating, EC)、超声波(ultrasound, US)、超高压(ultra-high pressure, UHP)、脉冲电场(pulsed electric field, PEF)、低温冷等离子体(cold plasma, CP)、电离辐射(ionizing radiation, IR)等。基于此,本文针对新型干燥预处理技术进行归类评述,并对其作用机制、适用范围以及未来发展趋势进行探讨,以期预处理技术在果蔬和水产品干燥领域中的应用提供理论依据和实践参考。

1 新型烫漂预处理

1.1 HHAI 烫漂

HHAI 烫漂(high humidity hot air impingement blanching, HHAIB)是指利用冲击技术产生的高速空气使物料悬浮,来自系统的高温蒸汽在物料表面高速撞击,完成烫漂的同时除去物料边界层水分的过程^[5]。传统 HWB 和蒸汽烫漂(steam blanching, SB)导致营养成分尤其水溶性物质(如维生素 C、 V_C)大量流失,对热敏性物料的营养物质造成极大地破坏^[6-7]。采用气体作为烫漂介质避免了传统 HWB 所造成的营养物质流失问题。HHAIB 系统利用喷嘴产生的高速空气使物料悬浮,造成假流化床现象,使物料与介质充分接触,高效完成烫漂处理。此外,采用射流冲击技术提高了烫漂时的对流换热系数,强化了烫漂过

程。相比 HWB 和 SB 等方式, HHAIB 对流交换系数更高,灭酶效果更彻底。因此, HHAIB 技术在食品干燥领域得到了广泛的应用^[8-10]。

1.1.1 HHAIB 在果蔬干燥中的应用 HHAIB 作为干燥预处理能够显著提高果蔬干燥速率,改善干制品品质。杜志龙等^[11]研究表明,在相同冲击温度(35 ℃)、气流速度(14.4 m/s)和相对湿度(relative humidity, RH 30%)条件下, HHAIB 的传热系数是 HWB 的 12 倍,并且 HHAIB 可有效减少营养物质尤其水溶性物质的损失。此外, HHAIB 比 SB 具有更高的传热效率。这是由于 HHAIB 系统产生的高强度冲击使物料表面产生轻微破裂,加速干燥过程的传热与传质。然而,处理时间过长,物料表面发生破裂,内部组织结构塌陷断裂,使物料干燥品质降低^[12]。Liu 等^[13]讨论了 HHAIB 处理时间(60、90、120、150 s)、干燥温度(60、65、70、75 ℃)、风速(6、9、12 m/s)对西兰花干燥特性和干制品品质的影响。结果表明,与对照相比,适当的 HHAIB 预处理可显著提高西兰花干燥速率、 V_C 保留率和复水能力,色泽更接近新鲜原料;烫漂时间过长(150 s),反而会使干燥时间延长。Wang 等^[14]研究了 HHAIB 处理时间(30、60、90、120、150、180、210、240 s)对红辣椒红色素含量、微观结构和干燥特性的影响。结果表明,多酚氧化酶活性(polyphenol oxidase, PPO)与 HHAIB 处理呈显著负相关;适当的 HHAIB 处理时间可显著提高干燥速率; HHAIB 处理时间<120 s 时,辣椒红色素无显著性差异,而漂烫时间>150 s 时,辣椒红色素含量显著降低。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)结果表明,红辣椒表面微小裂纹随 HHAIB 处理时间的延长而增加,裂纹的增加使水分扩散效率提升,干燥效率提高,但也会使 PPO 和红色素更容易受到破坏。

HHAIB 预处理在果蔬干燥领域报道较多,取得了显著强化干燥效率、改善干制品品质效果。但是, HHAIB 预处理对物料传热与传质规律、微观结构改性规律以及对后续干燥效率和品质影响等方面尚缺乏深入研究。

1.1.2 HHAIB 在水产品干燥中的应用 HHAIB 对果蔬细胞结构的高强度冲击,同样适用于水产品的干燥预处理。但是,目前 HHAIB 在水产品干燥领域的研究较少。高振江等^[10]采用 HHAIB 代替传统 HWB 和自然晾晒方法对海参进行干燥前预处理。结果表明,与 HWB 和自然晾晒相比, HHAIB 处理的海参营养物质损失较少,颜色和形状与新鲜海参更为接近。但是, HHAIB 预处理在水产品干燥领域亟需系统、深入探究。

HHAIB 在果蔬和水产品干燥领域可偏重:基于酶学和微生物学原理,探究 HHAIB 预处理钝化酶和抑菌机理; HHAIB 预处理对果蔬和水产品农药/渔药残留、过敏原钝化等涉及食品卫生与安全的指标是

否具有积极作用。

1.2 IR 烫漂

红外线是介于可见光(0.38~0.78 μm)和 MW (1~1000 mm)之间的一种电磁波,根据波长范围,通常可分为近红外(0.78~1.4 μm)、中红外(1.4~3.0 μm)和远红外(3.0~1000 μm)等 3 种^[15]。由于大多数食品成分(碳水化合物、蛋白质、脂质、水分等)在远红外区域吸收辐射能,而且 IR 穿透深度随波长增加而加深,因此,远红外辐射(far-infrared radiation, FIR)对于食品加工最常用^[16]。

远红外辐射烫漂(far-infrared blanching, FIRB)是指远红外射线以辐射能的形式将热量传递给物料的过程。与传统 HWB 和 SB 相比, FIRB 热量的传递高效且不需要介质参与,避免了污染微生物的可能性^[15-16]。FIRB 包括连续式和间歇式,连续式 FIRB 适用于快速钝化酶活性,间歇式 FIRB 通过控制加热温度达到节能和保质效果^[16]。因此,作为短暂的预处理手段, FIRB 在食品干燥领域具有良好的应用潜力和发展前景。

1.2.1 IR 在果蔬干燥中的应用 Shewale 等^[17]采用近红外(1.1~1.3 μm , 6 kW)辐射预处理苹果片(150 $^{\circ}\text{C}$, 45 s; 200 $^{\circ}\text{C}$, 30 s),然后采用 3 种干燥模式,即低湿热风干燥(low humidity air, LHA),热风干燥(hot air drying, HAD)和冷冻干燥(freeze drying, FD)。结果表明,近红外辐射预处理使苹果片的干燥时间缩短了 23%(LHA)和 17%(HAD),近红外辐射预处理耦合 LHA 有效地保留了苹果片的 V_c (80%~90%)和总酚含量(72%~74%),干制品品质接近 FD 苹果片。Nalawade 等^[18]比较了 FIRB、微波烫漂(microwave blanching, MWB)、HWB 和 SB 预处理对 HAD 苦瓜片品质的影响。结果表明, FIRB 和 MWB 处理的苦瓜片 V_c 保留率(FIRB, 93%; MWB, 95%)显著高于 HWB(47.5%)和 SB(58.1%)的样品, FIRB 苦瓜片综合干燥品质最优。Wu 等^[19]研究了马铃薯切片厚度(0.6、0.8、1.0、1.3 mm)对连续式红外烫漂-红外干燥马铃薯片颜色、质构和干燥速率的影响。结果表明,随着样品厚度的增加,马铃薯片残留的 PPO 活性降低,酶活钝化遵循一级反应动力学;马铃薯片干燥速率随切片厚度增加逐渐降低,马铃薯脆片最适加工参数为:切片厚度 0.8 mm,红外烫漂最佳参数为:辐射源与马铃薯片距离 9.5 cm,红外线烫漂时间 150 s,红外干燥最佳参数为:辐射源与马铃薯片距离 21.5 cm,干燥时间 330 s。Jamali 等^[20]探究红外烫漂温度和南瓜片厚度对过氧化物酶(peroxidase, POD)钝化效果的影响,结果表明,南瓜片 POD 钝化遵循一级反应动力学,南瓜片厚度为 4、8 mm 时,钝化 POD 酶所需活化能和 Z 值分别为 130.63、119.46 kJ/mol 和 18.18、17.85 $^{\circ}\text{C}$,而且厚度对活化能和 Z 值无显著影响;但是,烫漂温度和厚度对活化速率常数和 D 值具有显著影响;相比于烫漂温度,南瓜片厚度对产品的

总色差值影响更为显著。

1.2.2 FIRB 在水产品干燥中的应用 FIRB 在水产品干燥中应用较少,见诸于文献的报道多为 IR 干燥水产品,或者 IR 干燥与其他干燥方式组合,例如:HAD、微波干燥(microwave drying, MWD)、热泵干燥(heat pump drying, HPD),研究内容偏重 IR 参数对水产品干燥动力学和品质特性影响^[21]。此外,近红外光谱作为一种快速、无损检测手段,可用于水产品品质检测。

IR 加热是基于辐射源射线波长与被加热物料特征成分的吸收波长接近,产生类似物理学“共振现象”,进而使物料吸收辐射能,起到加热作用。但是,对于物料成分,尤其需要钝化的各类酶,目前尚缺乏较为全面、系统的吸收光谱图,这也为 IR 加热装备的设计带来困惑。因此, FIRB 在果蔬和水产品干燥领域应偏重:加强食品特征成分红外吸收光谱数据库的构建; FIRB 预处理对农药/渔药残留、过敏原钝化等涉及食品卫生与安全的指标是否具有积极作用亟需探究。

1.3 MW 烫漂

MWB 是指利用频率范围 300 MHz~300 GHz 的电磁波穿透物料,在物料内部转化成热能,使物料由内向外完成加热的过程^[22]。MW 技术通过电磁波直接传递到金属舱内,由各个方向发散出能量以加热物料。适当 MW 处理能够保持物料抗氧化活性,降低褐变率,果蔬细胞壁多糖结构改性,增加其亲水性^[23]。MW 加热温度高、速率快,加热速率随系统输出功率的增加而提高^[24-25],高温破坏物料中微生物和酶的蛋白质结构,从而达到良好的杀菌和灭酶效果。MWB 不需要借助水/蒸汽等介质就可以完成烫漂处理,能够减少物料加工过程中污染微生物的几率^[24]。

1.3.1 MWB 在果蔬干燥中的应用 MWB 能够破坏果蔬细胞壁/膜结构,使细胞壁多糖结构改性,促进后续干燥的快速进行^[26]。Liu 等^[27]比较了 MWB、HWB 和 SB 对紫薯 HAD 特性的影响。结果表明,相比于对照组, MWB 预处理使紫薯 HAD 时间缩短了 44%,干制品中花青素保留率为 59.35%,高于 HWB(53.55%)和 SB(40.37%)处理。Jiang 等^[28]发现,相比于 HWB 处理, MWB 的双孢菇片在 MW 真空干燥后微观结构更均匀,干燥时间缩短了 22%。Ruiz-Ojeda 等^[29]以 HWB 为对照,研究了 MW 功率(650、750、900 W)和处理时间(50、100、150、200、250、300 s)对青豆物理特性、酶活和 V_c 含量的影响。结果表明, POD 钝化是描述烫漂效果的最适指标,最适烫漂条件下, HWB 和 MWB 对青豆品质无显著影响,但是 MWB 显著缩短加工时间,而且 V_c 保留率高。因此, MWB 是替代 HWB 的有效方式。

1.3.2 MWB 在水产品干燥中的应用 对水产品而言, MWB 破坏生物组织细胞结构,进而内部水分状态发生重排。Binsi 等^[30]对新鲜鲶鱼片进行 MWB

处理,与对照相比,MWB使鲢鱼肉的硬度和咀嚼度增加,可能是由于MW加热促进鱼肉组织中水分转移,MW加热也加快了鱼肉蛋白质变性。此外,MWB对鱼肉中脂肪酸和矿物质组成的影响最小,并使其在后续贮藏中具有较高的稳定性。Zhu等^[31]采用HWB(70℃,5 min)和MW-US组合烫漂(MW功率:800、1000 W;US频率25 kHz,振幅50%、100%;烫漂时间:60、120、300 s)预处理翅藻(*Alaria esculenta*),然后进行后续HAD和FD,探究烫漂预处理对翅藻干制品品质影响。结果表明,脱水翅藻中含有76种挥发性成分,单独MWB(1000 W)和MW-US(MW 800 W,US振幅50%)具有最高的挥发性成分保留率(98.61%);而对于矿物质元素,烫漂预处理显著影响钠、铜、铁、锰等元素,而干燥方法显著影响钙、钴、铜、铁等元素。

MWB极易受物料形状、大小和物质组成成分的影响,MW穿透能力有限而且使物料受热不均匀,在部分物料还未达到设定温度时,其他部分就已经处于过热状态;不仅使物料过热烧焦,还会因为受热不均匀而产生不同程度的收缩。高强度的MWB可能会导致物料内部结构产生破坏,造成营养物质流失,破坏干制品感官品质等问题。所以,MWB应用于果蔬和水产品干燥时,要根据物料的种类、大小和形状选择合适的功率,例如:根据物料含水率变化而实施变功率调节;根据物料不同干燥阶段实施的变温调节等措施,从而达到良好的干燥效果。

1.4 RF 烫漂

RF指电磁波谱中频率范围1~300 MHz的电磁波(尽管工业上加热主要频率范围10~50 MHz)^[32]。RF工作原理与MW类似,都属于介电加热,二者区别:MW加热采用磁控管发射微波,经由波导转移至加热腔体,物料在腔体内吸收微波能,并通过偶极子极化和碰撞作用产生热能;RF加热则是将待加热物料置于一对平行电极板之间,物料吸收RF能量,通过离子迁移和偶极子旋转转变为热能,进而起到加热作用^[32]。

RF烫漂(radio frequency blanching, RFB)是指利用RF产生的能量对物料进行加热的过程。RFB具有较强的穿透能力,且加热均匀,与MWB和FIRB相比,更适宜于处理体积较大的物料。高强度RF电场会对物料内部组织结构造成破坏,使细胞膜破裂,内容物流出,促进组织中水分扩散。凭借这些特性,RFB能够作为一种新型预处理方式应用果蔬和水产品干燥领域,从而实现物料无接触式、均匀和快速加热。

1.4.1 RFB在果蔬干燥中的应用 Manzicco等^[33]比较了RFB(3.5 kW,27.12 MHz)和HWB处理对苹果氧化酶活性的影响。结果表明,与HWB相比,RFB能够有效抑制PPO和脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)活性,且苹果亮度和甜度更高,这是由于RFB处理不

需要介质参与,从而有效避免了以水作为介质造成的水溶性营养物质的流失。Zhang等^[34]研究了RFB对马铃薯PPO、色泽、质地和微观结构影响,结果表明,随着温度增加(25~85℃),PPO相对活性降低至小于10%;RFB 85℃时,PPO相对活性最低;圆二色谱分析表明,RFB改变了PPO的二级结构, α -螺旋含量降低,导致PPO完全失活;此外,RFB改变了马铃薯细胞和淀粉结构。Zhang等^[35]研究了RFB和HWB对马铃薯PPO、微观结构和淀粉颗粒特性影响。结果表明,随着RFB温度增加(50~90℃),残余PPO活性由60.47%降低至1.35%;与HWB相比,RFB获得相似的PPO钝化效果所需温度为70℃,因此,可以有效保留马铃薯物理特性;RFB和HWB改变了马铃薯细胞形貌和淀粉颗粒形态;相比于HWB,获得相同PPO钝化效果时,RFB引起的细胞壁/膜损伤较低。Gong等^[36]比较了热风辅助射频(hot air-assisted radio frequency, HA-RF)加热和超声波辅助渗透脱水(ultrasound-assisted osmotic dehydration, UOD)对胡萝卜同步烫漂和预干燥效果的影响。结果表明,胡萝卜经过HWB处理后,再经过30 min UOD处理,胡萝卜的湿基含水率降低至58.5%;然而HA-RF处理9.0~12 min,胡萝卜含水率降低至60.9%~71.9%,POD酶活降低至5%;UOD在降低胡萝卜水分活度和色泽方面具有显著优势,但是HA-RF则在 V_c 保留率和质构方面效果显著。此外,相比于HWB-UOD预处理(<0.20 kW·h/kg),HA-RF预处理能耗(0.67 kW·h/kg)显著降低。

1.4.2 RFB在水产品干燥中的应用 RF加热在水产品领域中的应用主要是杀菌方面,Uemura等^[37]采用RF(9 kW)加热秋刀鱼(19 min),直到鱼肉中心温度增加至130℃;对照组采用120℃、45 min。研究表明,RF加热可使枯草芽孢杆菌孢子数量降低5个对数级;而对照组降低4个对数级;RF处理后的肉色泽更加明亮。然而,RFB在水产品干燥领域方面的报道尚属空白,亟需系统、深入研究。

RF加热在果蔬和水产品干燥领域可偏重:为了有效设计RF加热系统,提高温度分布均匀性,亟需明晰各类食品材料的介电特性、形状、大小和在RF加热装置中的最适位置;RF加热对生鲜食品有害微生物和货架期方面的影响尚需系统、深入研究;电弧放电现象及其对包装材料的影响,开发适用于RF加热的包装材料。

2 非热力预处理

2.1 EC

EC是指选择天然的大分子多糖类、蛋白质类或脂类物质作为成膜剂,采用浸渍、喷洒等方式均匀涂抹于物料表面,在物料表面形成的一层透明薄膜^[3]。EC处理可以覆盖食品表面孔隙结构,进而隔绝氧气,缓解物料氧化变质;抑制微生物活性,防止腐败变质^[38]。目前,EC主要应用于新鲜果蔬,达到抑制呼

吸作用,减少营养成分消耗,延长果蔬货架期的作用。亲水胶体成膜预处理是一种新型的预处理方式,不仅降低了食品干燥过程中风味、色泽和营养素损失,而且不影响食品干燥效率,有些EC预处理甚至提高了物料干燥过程中有效水分扩散系数。EC作为一种新颖的非热力预处理,在果蔬和水产品干燥领域具有非常广阔的应用前景。

2.1.1 EC在果蔬干燥中的应用 Dinani等^[39]采用响应面法研究了羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)成膜预处理对香菇片对流干燥品质特性的影响。结果表明,CMC与氯化钙在香菇表面形成的交联网络结构起到屏障作用,限制了物料与干燥介质之间的空气交换,从而抑制香菇氧化、蛋白质变性和色泽变化,但会使香菇片硬度增加。Garcia等^[40]探究了果胶成膜预处理对番木瓜热风干燥特性和品质的影响,结果表明,与对照相比,果胶成膜预处理有效防止了活性成分的氧化反应,提高了维生素C的保留率;此外,成膜预处理的水分扩散系数高于对照组,这可能是与由于果胶的亲水特性所致;成膜预处理番木瓜干燥前后的细胞组织结构和新鲜番木瓜接近,说明果胶成膜预处理有效地保留了番木瓜的细胞结构。Silva等^[41]探究了果胶、乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)-槐豆胶(locust bean gum, LBG)等2种成膜预处理对菠萝HAD动力学与品质特性影响,结果表明,2种成膜预处理不会改变菠萝干燥效率;干燥温度60℃时,2种成膜预处理具有明显的氧气阻隔特性;但是,干燥温度为70℃时,果胶成膜预处理较WPI-LBG更能提高维生素C的保留率。Filho等^[42]研究了果胶成膜和HWB预处理对南瓜干燥动力学的影响。结果表明,恒速干燥速率由高到低依次为:HWB预处理>EC预处理>对照组;有效水分扩散系数由高到低依次为:EC预处理>HWB预处理>对照组;EC预处理和HWB预处理都可作为南瓜HAD预处理方式。Gamboa-Santos等^[43]采用海藻酸钠(sodium alginate, SA)-乳酸钙成膜预处理对草莓渗透脱水(osmotic dehydration, OD)-MWD效果的影响。结果表明,EC预处理显著降低OD过程中固形物的渗入,而对OD效率无影响;后续MVD中,EC预处理对草莓干燥速率和有效水分扩散系数无影响。

2.1.2 EC在水产品干燥中的应用 水产品OD过程中,过多的溶质(氯化钠)渗入导致肌肉蛋白质尤其肌原纤维蛋白黏弹性降低、品质下降。为抑制OD过程中溶质的过多渗入,提高扇贝柱OD效率,Tian等^[44]研究了壳聚糖(chitosan, CHI)、低甲氧基果胶(low methoxyl pectinate, LMP)和SA等3种成膜预处理对扇贝柱OD效率影响,结果表明,扇贝柱OD过程受到成膜材料种类、渗透溶液温度和氯化钠质量分数显著影响;SA和LMP成膜预处理后扇贝柱OD效率高于对照组。Shi等^[45]讨论了SA成膜预

处理、干燥温度和风速对HDP扇贝柱干燥动力学和品质特性的影响,结果表明,与未经成膜预处理的对照相比,SA成膜后的扇贝柱收缩率显著降低;有效水分扩散系数随SA预处理、干燥温度和风速的增加而增大;而干燥过程中所需的活化能则随SA预处理而降低。朱智壮等^[46]探究了亲水胶体成膜预处理对HPD扇贝柱干燥特性和品质特性的影响。结果表明,与未成膜对照组相比,LMP和CHI成膜预处理均显著提高了扇贝柱干燥速率,有效水分扩散系数分别提高了11.08%和26.73%,成膜预处理降低了扇贝柱的收缩率,提高了干制品的复水率。压差膨化干燥(explosion puffing drying, EPD)作为一种膨化技术,广泛应用于非油炸果蔬脆片加工,但对于蛋白质含量丰富的肉制品尤其水产品尚缺乏报道。基于此,Sui等^[47]采用亲水胶体SA成膜预处理扇贝柱,利用低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)技术,采用预干燥前成膜和2次成膜预处理,显著提高了EPD扇贝柱品质特性,使EPD技术应用于富含蛋白质的食品物料的膨化干燥成为可能;此外,作者将核磁共振弛豫参数 T_2 与扇贝柱品质特性关联,阐明扇贝柱压差膨化机理,该研究为EPD在蛋白质含量丰富的食品尤其水产品中的应用提供理论依据。

EC作为一种新颖的非热力预处理方式,在生鲜食品干燥领域崭露头角,但是EC预处理对于不同生鲜食品干燥效果尚需系统、深入研究。此外,未来EC预处理研究应偏重:亲水胶体膜的种类对食品干燥特性和品质的影响;亲水胶体膜在不同干燥条件下理化特性、力学特性、热力学特性和微观结构等变化规律;成膜条件下,食品内部微观结构变化规律,阐明成膜预处理对干燥效率和品质影响的机制。

2.2 US

US是指频率>20 kHz的声波^[48],根据频率范围,US可分为3类:低频率功率US(20~100 kHz)、高频率US(100 kHz~1 MHz)和诊断US(1~500 MHz)^[2]。高频US和诊断US主要用于分析材料的物理化学特性,而功率US主要用于破坏细胞结构,强化食品加工过程中的传热与传质^[49]。功率US的作用机理主要体现在2个方面:a.在US作用下,物料内部结构不断进行收缩和膨胀,最终形成海绵状结构;b.US使物料内部水分产生微小蒸汽气泡,气泡在物料内部迅速破裂、压缩或膨胀而形成空化效应^[49]。US预处理可缩短干燥时间,降低干燥能耗,改善干制品品质,在食品干燥领域具有非常广阔的应用前景。

2.2.1 US在果蔬干燥中的应用 US预处理可强化传导、对流和辐射等干燥方法。Tao等^[50]研究表明,接触式US可有效缩短大蒜片HAD时间,US可同时强化水分内扩散和水分外扩散,US耦合HAD可有效保留大蒜风味成分和色泽。Dehghannya等^[51]采用US辅助强化马铃薯间歇MW-HAD联合干燥。

结果表明,US 处理 10 min,然后 MW 干燥(900 W,脉冲比 4),马铃薯干燥效率最高;干燥效率随 US 时间、MW 功率和脉冲比增加而提高,而收缩率随 US 时间和 MW 脉冲比的减少而降低。Guo 等^[52]研究了接触式 US 对胡萝卜片 IR 干燥效果的影响,结果表明,US 预处理显著提高了胡萝卜片干燥速率和复水比,与单一 IR 相比,US 预处理可使 IR 干燥时间缩短 21%(IR 900 W)、17%(IR 1200 W)和 11%(IR 1500 W);US 预处理导致胡萝卜组织形成更多的多孔结构,促进水分迁移。Krishnan 等^[53]研究表明,象桔干燥至含水率 8.5% 时,托盘干燥(tray drying, TD)、真空干燥(vacuum drying, VD)和 US 辅助真空干燥(ultrasonic vacuum drying, UVD)所需时间分别是 930、870、690 min;UVD 色泽也优于其他 2 种方法。Merone 等^[54]以胡萝卜和茄子为研究对象,以能耗和环保为评判指标,探究 US 在常压冷冻干燥(ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying)中的应用。结果表明,US 预处理使干燥总能耗降低 70%,生命周期评估(life cycle assessment, LCA)表明,与传统 FD 相比,采用 US 预处理时,所研究的每种研究类别降低 58%~82%(具体值取决于产品和影响类别)。

2.2.2 US 在水产品干燥中的应用 US 预处理在水产品干燥中也展示出良好的效果。Zhu 等^[2]利用 LF-NMR 分析了不同功率(90、180 W)US 预处理对扇贝柱 HPD 动力学及品质影响,结果表明,US 预处理破坏了扇贝柱结构,促进扇贝柱中结合水向自由水的转化,从而提高 HPD 效率;功率 90 和 180 W 的 US 预处理使扇贝柱有效水分扩散系数提高了 12.43% 和 23.35%;此外,US 预处理可降低扇贝柱总色差和硬度,但对收缩率和复水速率影响不显著。Santacatalina 等^[55]研究了 US(20.5 kW/m³)预处理对脱盐鳕鱼片(50 mm×30 mm×5 mm)在不同 HAD 温度(-10、0、10 ℃)条件下动力学特性和品质的影响,结果表明,US 预处理可提高低温干燥鳕鱼干燥速率,尤其对于-10℃干燥;US 预处理略微降低了鳕鱼片复水速率,但增加了样品硬度,而且干制品色泽更好。Kadam 等^[56]研究了 US 预处理对褐藻 HAD 动力学影响,结果表明,US 预处理显著缩短干燥时间,降低能耗;而且,US 预处理有利于保持干制品的色泽。此外,US 预处理在强化干制品复水特性方面也有明显效果,Zhang 等^[57]研究了 US 预处理对干制海参复水特性的影响,结果表明,随着 US 功率由 100 W 增加至 300 W,频率由 45 kHz 降低至 28 kHz,干制海参复水比和持水性增加;随着 US 功率增加,复水过程中不易流动水和自由水比例增加,进而提升了海参的持水力;US 辅助复水使干制海参复水效率提高 12 倍,节约复水时间 44 h,而且对海参质构无任何不利影响。

US 在食品干燥领域研究较多,尤其在果蔬干燥

领域,但是在水产品干燥领域研究的广度和深度较为欠缺。此外,US 在食品干燥领域研究应偏重:a.基于多学科(如声学、化学、力学和材料科学等)交叉的 US 强化干燥效率机理;b.目前 US 辅助干燥研究多在实验室范围内,开发工业化应用的 US 设备是未来发展趋势。

2.3 PEF

PEF 指通过施加外加电场(食品领域常采用 200~1000 V/cm)使生物细胞膜内外产生的电位差,当电位差超过细胞膜临界值时,发生电穿孔效应,导致细胞膜破裂,通透性增强^[3-4]。PEF 电穿孔效应使细胞膜局部失去选择透过性,细胞膜通透性增加,导致微生物死亡。此外,对于食品物料而言,细胞膜破裂加速物料中热量和水分的传递速率,提高干燥效率。

2.3.1 PEF 在果蔬干燥中的应用 PEF 预处理也可强化传导、对流和辐射等干燥方法。Yamakage 等^[58]比较了 PEF、HWB 和对照组对菠菜 HAD 动力学和品质特性影响,研究表明,PEF 预处理抑制干制品收缩,提高了干燥速率;与 HWB 和对照相比,PEF 预处理降低了菠菜抗坏血酸降解率,保持了菠菜表面色泽。Liu 等^[59]研究表明,PEF 预处理强化了胡萝卜片的 VD 动力学,尤其干燥温度低时更为明显,例如:干燥温度为 25 和 90 ℃ 时,PEF 预处理可使胡萝卜片干燥时间分别缩短 55% 和 33%;相比于对照,PEF 预处理对 VD 胡萝卜色泽影响较小。Lammerskitten 等^[60]研究表明,相比于对照,PEF 预处理可强化苹果片 FD 效率,有效水分扩散系数提高 44%,干燥时间缩短 57%;尽管 PEF 预处理后的 FD 苹果片初始水分活度高,但是对照组苹果片贮藏过程中水分吸附能力更强,因此贮藏稳定性:PEF 预处理>对照组,这是由于 PEF 预处理的苹果片结晶度(35.5%)高于对照组(11.0%)。Rybak 等^[61]采用 PEF 预处理红甜椒,然后榨汁,最后进行喷雾干燥(spray drying, SD)。结果表明,与对照相比,PEF 预处理所得的 SD 粉具有维生素 C 含量高、粉末粒径大、粉末吸湿性低等特性。Andreou 等^[62]采用 PEF(0.5~1.5 kV/cm, 时间 1.3、2.2、135.0 ms)预处理西葫芦,然后进行 HAD(40~70 ℃);此外,PEF(1.5 kV/cm, 500 次脉冲)预处理后西葫芦,然后进行后续深层油炸(150、160、170 ℃)。研究表明,相比于对照,PEF 可提高西葫芦 HAD 过程中有效水分扩散系数 35%,减少干燥时间 25 min,节能 169 MJ/kg;此外,相比于对照,PEF 预处理可使油炸西葫芦含油量减少 36%。

PEF-US 联合预处理,在果蔬干燥领域展示良好效果,Wiktor 等^[63]研究了 PEF、US 联合预处理(PEF-US 和 US-PEF)对胡萝卜 HAD 动力学和品质的影响。结果表明,联合预处理使干燥时间由对照组 298 min 缩短至 180~255 min;PEF-US 预处理胡萝卜具有最高的有效水分扩散系数($11.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$),其值较对照组高 63%;相比于对照,PEF、US 联合预

处理具有较高的胡萝卜素保留率(60.5%~80.6%)、较低的吸湿能力,而且色泽良好(即红度值高,黄度值低)。Li等^[64]研究了PEF、US和PEF-US对香菇HAD传质和品质特性影响,结果表明,相比于对照,预处理可加速香菇HAD过程中传质效率,缩短干燥时间,降低干燥能耗;预处理使香菇细胞内空间拓展,形成大空洞,进而促进干燥和干制品复水过程;预处理可有效保留干制品色泽和营养特性;预处理组中,PEF-US处理香菇的干燥时间(4.7 h)最短,酚类物质含量(224.17 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$)和可溶性糖(3.90 mg/mL)含量最高。

2.3.2 PEF在水产品干燥中的应用 电场预处理在水产品干燥领域报道较少。Semenoglou等^[65]研究了PEF预处理(1.6 kV/cm, 1500 脉冲/19.7 kJ/kg)对海鲈鱼鱼片OD效果的影响。结果表明,1500 脉冲PEF预处理使鱼片有效水分扩散系数提高50%,溶质扩散系数提高66%。Bai等^[66]采用电流体动力学干燥(electrohydrodynamic drying, EHD)(45 kV, 8 h, 环境温度15 $^{\circ}\text{C}$, RH 65%)、HAD(60 $^{\circ}\text{C}$)和风干(15 $^{\circ}\text{C}$, RH 65%)等3种方式干燥虾肉。结果表明,EHD、HAD和风干分别去除71.1%、91.8%和16.4%虾肉水分;干燥前6 h,3种干燥方式的平均干燥速率分别为62.95、81.76和16.24 mg/min;相比于HAD,EHD虾肉收缩率低、复水率和色泽增加。Bai等^[67]探讨了EHD、FD和EHD-FD等3种干燥方式对海参干燥效果影响。结果表明,相比于FD,EHD-FD可显著缩短干燥时间,降低干燥能耗;而且干制品收缩率降低,复水率、蛋白质含量增加。Tamarit-Pino等^[68]采用EHD(20、30、45 kV,时间30、45、60 min,介质温度25.6 $^{\circ}\text{C}$, RH 54.8%)预处理海参,然后进行FD(EHD-FD),此外,海参进行FD和日光干燥,探究3种方式对海参干燥特性与品质影响。结果表明,随着电压增加,海参表面水分蒸发加快,初始干燥速率增加;30 kV、30 min预处理干燥效率最高,而且干制品复水比高;日光干燥表面硬化最严重,其次是EHD-FD,最后是FD,这和海参复水率变化吻合。

PEF在食品干燥领域应用大多处于实验室规模,而且集中在果蔬干燥领域,而对于水产品干燥领域研究不够深入。但是,PEF在食品干燥领域中应用远远达不到工业化规模,这主要是因为:PEF机理尚未明确;PEF预处理效果显著依赖于干燥方式和食品种类,但这方面的数据较为欠缺。此外,同PEF类似,脉冲磁场(Pulsed magnetic field, PMF)是由变化的脉冲电场产生,其在食品干燥领域同样具有潜在的研发和应用前景。

2.4 CP

CP是一种含有不同电子、离子和中性活性物质的电离气体。等离子体被称为第4态物质,包含许多活性物质,如电子、正负离子、自由基、激发态或非激发态粒子^[69]。CP中电子和其他粒子处于非热

力学平衡状态,电子温度远大于其他粒子温度,体系能量主要集中在高能电子中,因此整体温度可维持在较低水平。CP的产生过程可分为电子碰撞阶段和重粒子碰撞阶段。常见的产生方式有大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jets, APPJ)、介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)、电晕放电(corona discharge, CD)、微波放电(microwave discharges, MD),食品加工中,最常用的是APPJ与DBD^[70-71]。CP在食品工业领域的应用主要有食品杀菌、抑制酶活性、抑制蛋白质类过敏源、食品组分改性、包装材料改良、农药降解等^[71]。

2.4.1 CP在果蔬干燥中的应用 应用CP作为预处理方式在生鲜食品干燥中报道较少,Zhang等^[72]采用CP(15、30、45、60 s)预处理红辣椒,探究其对HAD动力学及品质特性的影响。结果表明,CP预处理能够提高红辣椒干燥速率,预处理30 s干燥效率最佳;CP预处理时间对干制品色泽无显著影响;CP预处理时间30 s时,红辣椒色素含量显著提高,但是,CP预处理时间高于30 s时,色素含量逐渐降低;抗氧化能力则随CP预处理时间延长而增加;CP预处理后的辣椒具有明显的孔隙结构;干燥过程中水分通过孔隙结构进行转移,从而加快干燥速率;另外,CP预处理会引起细胞超微结构改变,这种改变可能促进了细胞内水分和植物化学物质的扩散。Zhou等^[73]研究了CP(15、30、45、60 s)预处理对枸杞HAD动力学和品质特性影响,同时与化学预处理(碳酸钠溶液)和未进行任何预处理组进行对比。结果表明,适宜CP预处理可缩短50%干燥时间;CP预处理增加枸杞复水率7%~16%,干制品色泽显著强于对照组,总色差降低18%~27%;随着CP处理时间延长,营养素含量呈先增加而后降低趋势;这主要是由于细胞壁、细胞膜随CP处理时间延长而破裂,促进了水分和营养素的释放和扩散,进而强化了干燥效率和营养素提取。Bao等^[74]探究CP(15、30、60 s)预处理对枣片HAD(50、60、70 $^{\circ}\text{C}$)效果的影响。结果表明,CP蚀刻作用改变了枣片表面形貌,促进水分迁移,进而强化干燥效率和有效水分扩散;CP预处理使枣片原花青素、黄酮和酚类成分分别增加53.81%、33.89%和13.85%,使抗氧化能力最多增加36.85%;CP预处理可降低5-羟甲基糠醛52.19%。Loureiro等^[71]研究了CP激发频率(200、500、800 Hz)对Tucumã(*Astrocaryum aculeatum*)干燥过程和生物活性成分影响。结果表明,CP预处理改变果片表面结构,促进水分扩散,提高干燥速率,缩短干燥时间;不同频率预处理之间干制品色泽和干燥时间差异不显著;CP预处理提高了酚类含量(45.3 mg GAE/g)和抗氧化成分含量(799.8 $\mu\text{m ET}$)。

2.4.2 CP在水产品干燥中的应用 CP在水产品中的应用主要集中在生鲜水产品或水产加工制品贮藏保鲜方面,通过CP对微生物抑制和钝化酶的作用,

延长水产品货架期^[75]。此外,CP 预处理可以影响水产品品质特性,主要体现在理化特性、脂肪酸组成、脂质降解和蛋白质氧化、结构改性等方面^[75-76]。但是,CP 作为预处理方式,在水产品干燥领域尚未有报道,亟需系统、深入研究。

综上,CP 作为新型杀菌方法,在生鲜食品贮藏保鲜领域应用较多,但是在生鲜食品干燥领域应用报道较少,但是潜力巨大,未来研究应偏重: a.CP 预处理在生鲜食品干燥领域的应用的广度和深度亟需加强; b.CP 在干制品杀(抑)菌、杀虫等方面的研究; c.CP 预处理对干制品营养素影响规律和变化机制。

2.5 其他新型预处理方式

欧姆加热 (Ohmic heating, OH), 又称电阻加热、焦耳加热,是指将物料置于 2 个电极之间,利用食品本身具有的介电特性,当电流通过食品时,在食品内部电能转化为热能,起到加热、杀菌等作用。欧姆烫漂 (ohmic blanching, OHB) 预处理时间短,而且产品营养素、色泽、质构优,可替代传统 HWB 和 SB,应用于樱桃、草莓、菊芋、胡萝卜等果蔬及其制品烫漂预处理;烫漂温度难于精准控制、水分子电解产生氢气和氧气、电极易于腐蚀是 OH 在食品烫漂预处理领域应用存在的问题^[16]。IR 是指采用极短波长、高强度电磁波发射能量,使被辐照物质原子电离的过程。常用射线包括 X-射线、 γ -射线、电子射线,可对被辐照物质产生直接和间接影响;直接影响是指对细胞成分如 DNA、脂质等影响,间接影响是电离产生的自由基和活性基团与细胞或食品成分作用;IR 在食品领域用于主要集中在杀(抑)菌、钝化酶、杀虫等方面^[77-78]。UHP 是指将物料置于 100~1000 MPa,维持一段时间,达到杀菌^[79]、物料改性^[80]、调控生化反应速率^[81]等目的。目前,OH、IR 和 UHP 等在果蔬和水产品干燥领域应用报道少。但是,这些新型预处理具有潜在的强化干燥效率和改善干制品品质效果,亟需全面、深入研究。

3 结语

干燥前预处理可显著强化果蔬和水产品干燥特性,改善干制品品质。新型热力或非热力预处理技术通过电场磁场或声波等形式对物料内部结构进行改造,以达到缩短干燥时间、提高干燥品质、节能等目的。未来干燥预处理领域应偏重: a.新型预处理技术(如 IR、PEF、CP 等)在水产品干燥领域的研究较少,因此对于其加工条件、操作参数和作用机理值得进一步的研究; b.对于 MW、RF 等技术,作为干燥预处理方式尚存在一些缺陷,例如:加热不均匀、受影响因素过多等,这些不足可以作为未来预处理技术研究的突破点; c.生鲜食品结构复杂多样,目前大部分预处理技术仅能满足部分物料的预处理要求,基于材料科学与工程基本理论,将其与干燥预处理方式结合,探究预处理提高干燥效率机理,是未来干燥领域的研究重点和难点; d.研发一类影响因素少、涵盖范围广

的新型预处理技术,也成为干燥预处理技术研究的重点; e.可以根据不同食品种类、组织结构特点,将不同预处理技术结合使用,取长补短,以达到干燥过程和干制品品质的最优效果,使干燥预处理技术成为食品干燥领域提高干燥效率、改善产品品质的有效途径。

参考文献

- [1] ZHANG M, CHEN H Z, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1239-1255.
- [2] ZHU Z Z, ZHAO Y, ZHANG Y X, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the drying kinetics, water status and distribution in scallop adductors during heat pump drying[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(15): 6239-6247.
- [3] BASSEY E J, CHENG J H, SUN D W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 137-148.
- [4] DENG L Z, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(9): 1408-1432.
- [5] XIAO H W, GAO Z J, LIN H A I, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2010, 33(5): 899-918.
- [6] MANAGA M G, REMIZE F, GARCIA C, et al. Effect of moist cooking blanching on colour, phenolic metabolites and glucosinolate content in chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *chinensis*)[J]. *Foods*, 2019, 8(9): 399.
- [7] EYARKAI NAMBI V, GUPTA R K, KUMAR S, et al. Degradation kinetics of bioactive components, antioxidant activity, colour and textural properties of selected vegetables during blanching[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(7): 3073-3082.
- [8] 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.
- [9] BAI J W, SUN D W, XIAO H W, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20: 230-237.
- [10] 高振江, 肖红伟. 气体射流冲击海参干燥方法与装置: 中国, 200710176389.5 [P]. 2010-06-02. [GAO Z, XIAO H W. Air impingement drying method and apparatus for sea cucumber: China, 200710176389.5 [P]. 2010-06-02.]
- [11] 杜志龙, 高振江, 张世湘. 气体射流冲击对流换热系数试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(S2): 1-4. [DU Zhilong, GAO Zhenjiang, ZHANG Shixiang. Research on convective heat transfer coefficient with air jet impinging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(S2): 1-4.]
- [12] DENG L Z, PAN Z L, MUJUDER A S, et al. High-humidity

hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure[J]. *Food Control*, 2019, 96: 104–111.

[13] LIU Z L, BAI J W, YANG W X, et al. Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) and drying parameters on drying characteristics and quality of broccoli florets[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(10): 1251–1264.

[14] WANG J, FANG X M, MUJUMDAR A S, et al. Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 145–152.

[15] 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.

[16] XIAO H W, PAN Z L, DENG L Z, et al. Recent developments and trends in thermal blanching-A comprehensive review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2017, 4: 101–127.

[17] SHEWALE S R, HEBBAR H U. Effect of infrared pretreatment on low-humidity air drying of apple slices[J]. *Drying Technology*, 2016, 35(4): 490–499.

[18] NALAWADE S A, SINHA A, HEBBAR H U. Infrared based dry blanching and hybrid drying of bitter melon slices: Process efficiency evaluation[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(4): e12672.

[19] WU B G, GUO Y T, WANG J, et al. Effect of thickness on non-fried potato chips subjected to infrared radiation blanching and drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 237: 249–255.

[20] JAMALI S N, KASHANINEJAD M, AMIRABADI A A, et al. Kinetics of peroxidase inactivation, color and temperature changes during pumpkin (*Cucurbita moschata*) blanching using infrared heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 93: 456–462.

[21] CHEGN S S, SU W T, YUAN L, et al. Recent developments of drying techniques for aquatic products: With emphasis on drying process monitoring with innovative methods[J]. *Drying Technology*, 2021, 39(11): 1577–1594.

[22] KUMAR C, KARIM M A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 379–394.

[23] FEUMBA DIBANDA R, PANYOO AKDOWA E, RANI P A, et al. Effect of microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peels[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125308.

[24] RANJAN S, DASGUPTA N, WALIA N, et al. Microwave blanching: An emerging trend in food engineering and its effects on *Capsicum annuum* L[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2): e12411.

[25] BAŞKAYA SEZER D, DEMIRDÖVEN A. The Effects of microwave blanching conditions on carrot slices: Optimization and comparison[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2188–2196.

[26] ZIELINSKA M, ZIELINSKA D, MARKOWSKI M. The Effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, col-

or and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(3): 585–602.

[27] LIU P, MUJUMDAR A S, ZHANG M, et al. Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave-assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato[J]. *Drying Technology*, 2014, 33(1): 66–71.

[28] JIANG N, LIU C, LI D, et al. Effect of blanching on the dielectric properties and microwave vacuum drying behavior of *Agaricus bisporus* slices[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 89–97.

[29] RUIZ-OJEDA L M, PENAS F J. Comparison study of conventional hot-water and microwave blanching on quality of green beans[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20: 191–197.

[30] BINSI P K, NINAN G, ZYNUDHEEN A A, et al. Compositional and chill storage characteristics of microwave-blanched sutchi catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) fillets[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(2): 364–372.

[31] ZHU X L, HEALY L E, SEVINDIK O, et al. Impacts of novel blanching treatments combined with commercial drying methods on the physicochemical properties of Irish brown seaweed *Alaria esculenta* [J]. *Food Chemistry*, 2022, 369: 130949.

[32] MARRA F, ZHANG L, LYNG J G. Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(4): 497–508.

[33] MANZOCCO L, ANESE M, NICOLI M C. Radiofrequency inactivation of oxidative food enzymes in model systems and apple derivatives[J]. *Food Research International*, 2008, 41(10): 1044–1049.

[34] ZHANG Z N, WANG J, ZHANG X Y, et al. Effects of radio frequency assisted blanching on polyphenol oxidase, weight loss, texture, color and microstructure of potato[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248: 173–182.

[35] ZHANG Z N, YAO Y S, SHI Q L, et al. Effects of radio frequency-assisted blanching on the polyphenol oxidase, microstructure, physical characteristics, and starch content of potato[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 125: 109357.

[36] GONG C T, ZHANG H J, YUE J, et al. Investigation of hot-air-assisted radio frequency heating as a simultaneous dry-blanching and pre-drying method for carrot cubes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102181.

[37] UEMURA K, KANAFUSA S, TAKAHASHI C, et al. Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuum-packed fish in water[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2017, 81(4): 762–767.

[38] DOS PASSOS BRAGA S, LUNDGREN G A, MACEDO S A, et al. Application of coatings formed by chitosan and *Mentha* essential oils to control anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides* and *C. brevisporum* in papaya (*Carica papaya* L.) fruit[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 631–639.

[39] DINANI S T, HAMDAMI N, SHAHEDI M, et al. Optimiza-

- tion of carboxymethyl cellulose and calcium chloride dip-coating on mushroom slices prior to hot air drying using response surface methodology[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(3): 1269–1278.
- [40] GARCIA C C, CAETANO L C, de SOUZA SILVA K, et al. Influence of edible coating on the drying and quality of papaya (*Carica papaya*)[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(10): 2828–2839.
- [41] SILVA K S, GARCIA C C, AMADO L R, et al. Effects of edible coatings on convective drying and characteristics of the dried pineapple[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(7): 1465–1475.
- [42] FILHO L M, FRASCARELI E C, MAURO M A. Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*)[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(5): 859–871.
- [43] GAMBOA-SANTOS J, CAMPANONE L A. Application of osmotic dehydration and microwave drying to strawberries coated with edible films[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(8): 1002–1012.
- [44] TIAN Y, ZHAO Y, SHI Q L. Appropriate coating pretreatment enhancing osmotic dehydration efficiency of scallop adductors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 266–273.
- [45] SHI Q L, TIAN Y, ZHU L L, et al. Effects of sodium alginate-based coating pretreatment on drying characteristics and quality of heat pump dried scallop adductors[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(10): 4781–4792.
- [46] 朱智壮, 张越翔, 刘静, 等. 亲水胶体成膜预处理对扇贝柱热泵干燥动力学与品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 55–60. [ZHU Zhizhuang, ZHANG Yuexiang, LIU Jing, et al. Effects of hydrocolloids coating pretreatment on the drying kinetics and quality attributes of heat pump dried scallop adductors[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 55–60.]
- [47] SUI X L, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Hydrocolloid coating pretreatment makes explosion puffing drying applicable in protein-rich foods-A case study of scallop adductors[J/OL]. *Drying Technology*, 2022, 40(1): 50–64.
- [48] ZHANG Y W, ABATZOGLOU N. Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, 154: 21–46.
- [49] MUSIELAK G, MIERZWA D, KROEHNKE J. Food drying enhancement by ultrasound-A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 56: 126–141.
- [50] TAO Y, ZHAGN J L, JIANG S R, et al. Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 235: 79–88.
- [51] DEGHANNYA J, KADKHODAEI S, HESHMATI M K, et al. Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave-hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption[J]. *Ultrasonics*, 2019, 96: 104–122.
- [52] GUO Y T, WU B G, GUO X Y, et al. Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characteristics[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 126: 109312.
- [53] KRISHNAN K R, RAYAGURU K R, NAYAK P K. Ultrasonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices[K]. *Food Bioscience*, 2020, 36: 100629.
- [54] MERONE D, COLUCCI D, SANJUAN N, et al. Energy and environmental analysis of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying of food[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 283: 110031.
- [55] SANTACATALINA J V, GUERRERO M E, CARCIA-PEREZ J V, et al. Ultrasonically assisted low-temperature drying of desalted codfish[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 444–460.
- [56] KADAM S U, TIWARI B K, O'DONNELL C P. Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*[J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2015, 23: 302–307.
- [57] ZHANG L T, HUANG X H, MIAO S, et al. Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 178: 203–211.
- [58] YAMAKAGE K, YAMADA T, TAKAHASHI K, et al. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102615.
- [59] LIU C Y, PIROZZI A, FERRARI G, et al. Impact of pulsed electric fields on vacuum drying kinetics and physicochemical properties of carrot[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109658.
- [60] LAMMERSKITTEN A, WIKTOR A, SIEMER C, et al. The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 252: 36–43.
- [61] RYBAK K, SAMBORSKA K, JEDLINSKA A, et al. The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102446.
- [62] ANDREOU V, DIMOPOULOS G, TSONAS T, et al. Pulsed electric fields-assisted drying and frying of fresh zucchini[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14: 2091–2106.
- [63] WIKTOR A, DADAN M, NOWACKA M, et al. The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 110: 71–79.
- [64] LI X, LI J, WANG R, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112008.
- [65] SEMENOGLOU I, DIMOPOULOS G, TSIRONI T, et al. Mathematical modelling of the effect of solution concentration and the combined application of pulsed electric fields on mass transfer during osmotic dehydration of sea bass fillets[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 121: 186–192.
- [66] BAI Y X, SUNG B. Study of electrohydrodynamic (EHD) drying technique for shrimps[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2011, 35(6): 891–897.

- [67] BAI Y X, YANG Y X, HUANG Q. Combined electrohydrodynamic (EHD) and vacuum freeze drying of sea cucumber[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(10): 1051–1055.
- [68] TAMARIT-PINO Y, BATÍAS-MONTES, SEGURA-PONCE L A, et al. Effect of electrohydrodynamic pretreatment on drying rate and rehydration properties of Chilean sea cucumber (*Athyonidium chilensis*) [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2020, 123: 284–295.
- [69] SAREMNEZHAD S, SOLTANI M, FARAJI A, et al. Chemical changes of food constituents during cold plasma processing: A review[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110552.
- [70] LAROQUE D A, SEO S T, VALENCIA G A, et al. Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 312: 11078.
- [71] LOUREIRO A da C, SOUZA F das C do A, SANCHES E A, et al. Cold plasma techniques as a pretreatment for drying fruits: Evaluation of the excitation frequency on drying process and bioactive compounds[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110462.
- [72] ZHANG X L, ZHONG C S, MUJUMDAR A S, et al. Cold plasma pretreatment enhances drying kinetics and quality attributes of chilli pepper (*Capsium annuum* L.) *Journal of Food Engineering*, 2019, 241: 51–57.
- [73] ZHOU Y H, VIDYARTHI S K, ZHONG C S, et al. Cold plasma enhances drying and color, rehydration ratio and polyphenols of wolfberry via microstructure and ultrastructure alternation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110173.
- [74] BAO T, HAO X, SHISHIR R I, et al. Cold plasma: An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices[J]. *Food Chemistry*, 2021, 337: 127783.
- [75] OLATUNDE O O, SHIEKH K A, BENJAKUL S. Pros and cons of cold plasma technology as an alternative non-thermal processing technology in seafood industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 617–627.
- [76] WEI S, CHELLIAH R, OH C D, LIU S C, et al. Application of cold plasma on aquatic products. In DING T, CULLEN P J, YAN W J. Applications of cold plasma in food safety[M]. Springer, and Jointly Published with Zhejiang University Press, 2022.
- [77] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables-a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 372–385.
- [78] AKHILA P P, SUNOOJ K V, AALIYA B, et al. Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 399–409.
- [79] AGREGÁN R, MUNEKATA P E S, ZHANG W G, et al. High-pressure processing in inactivation of *Salmonella* spp. in food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 107: 31–37.
- [80] ZHU F. Structure and physicochemical properties of starch affected by dynamic pressure treatment: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116: 639–654.
- [81] HUANG H W, HSU C P, WANG C Y. Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry [J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2020, 28: 1–13.