

杨大恒, 赵宜范, 张丽红, 等. 物理场辅助渗透脱水技术及其在果蔬干燥中的应用 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 435-440. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120138

YANG Daheng, ZHAO Yifan, ZHANG Lihong, et al. Physical Field-Assisted Osmotic Dehydration Technology and Its Application in Fruit and Vegetable Drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 435-440. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120138

· 专题综述 ·

物理场辅助渗透脱水技术及其在果蔬干燥中的应用

杨大恒^{1,2}, 赵宜范², 张丽红², 孟庆瑶², 李晓燕^{2,*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学能源与建筑工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘要: 渗透脱水是一种促进果蔬干燥、保持果蔬感官和功能特性、延长果蔬货架期的非热加工技术。渗透脱水技术的主要缺点是传质效率低, 物理场辅助渗透脱水技术可有效地提升渗透脱水效率。物理场辅助渗透脱水技术包括: 超声波辅助技术、真空辅助技术、高静水压和高压脉冲电场辅助技术, 是近年来果蔬干燥研究的热点。通过研究归纳国内外相关文献, 分别从果蔬渗透脱水的机理及其传质效率影响因素、物理场辅助渗透脱水技术及动力学模型、物理场辅助渗透脱水在果蔬干燥的应用 3 个方面综述了物理场辅助渗透脱水技术近年来的研究进展, 总结应用中存在的问题, 提出未来发展方向。

关键词: 渗透脱水, 超声波辅助技术, 真空, 高压脉冲电场, 高静水压

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)13-0435-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120138

Physical Field-Assisted Osmotic Dehydration Technology and Its Application in Fruit and Vegetable Drying

YANG Daheng^{1,2}, ZHAO Yifan², ZHANG Lihong², MENG Qingyao², LI Xiaoyan^{2,*}

(1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. School of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: Osmotic dehydration is a non-thermal processing technology that can promote the dehydration of fruits and vegetables while maintaining their sensory and functional properties and extending the shelf life. However, the main disadvantage of osmotic dehydration technology is the low mass transfer efficiency. Physical field assisted osmotic dehydration technology can effectively improve the efficiency of osmotic dehydration. Physical field assisted osmotic dehydration technology includes ultrasonic, gamma ray, pulsed electric field, vacuum and high hydrostatic pressure assisted osmotic dehydration. Physical field assisted osmotic dehydration technologies and their application in fruits and vegetables are studied in this paper and some new research progresses and the problems are discussed. The mechanism and factors affecting mass transfer efficiency of osmotic dehydration, physical field assisted osmotic dehydration technology, dynamic model and the application of physical field assisted osmotic dehydration in fruit and vegetable drying are discussed.

Key words: osmotic dehydration; ultrasound assisted technology; vacuum; pulsed electric field; high hydrostatic pressure

我国是果蔬损耗大国, 据统计每年我国果蔬损耗量可达到 20%, 远高于发达国家 5% 的损耗率^[1]。果蔬损耗的主要原因是其含水量高而造成的腐烂。

为了降低果蔬损耗率, 提高果蔬的保质期, 国内外学者尝试了许多方法, 其中渗透脱水是有效方法之一^[2]。渗透脱水可作为一种预处理干燥保鲜技术, 在果

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51476049); 哈尔滨市科技局项目(2016RAQXJ023); 哈尔滨商业大学领军人才培养计划 201908。

作者简介: 杨大恒(1978-), 男, 博士在读, 副教授, 研究方向: 食品冷冻冷藏, E-mail: 22051977@qq.com。

* 通信作者: 李晓燕(1960-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 制冷节能与蓄冷技术, E-mail: mylxxy6168@sina.com。

蔬脱水加工中与后续的干燥、冷冻等工艺联合使用^[3]。渗透脱水是指在一定温度下,将果蔬或肉类浸泡在渗透溶质中,使样品细胞中的水分在渗透压的作用下自发迁移,以实现脱水的目的。与传统的热风、热泵干燥相比,渗透脱水是一种非热加工技术,因渗透脱水温度相对较低且果蔬中的水分不发生相变,因而可以破坏果蔬的营养、感官和功能特性^[4]。此外,渗透脱水还可以通过缩短后续热风、冷冻和流化床干燥时间,以降低干燥能耗^[5]、实现延长果蔬货架期的目的。单一的渗透脱水传质速率较低,物理场辅助技术如超声波、真空、高静水压可提升水分迁移速率,具有广泛的应用前景。

本文从渗透脱水机理及其传质效率影响因素、物理场辅助渗透脱水技术及动力学模型、物理场辅助渗透脱水技术在果蔬干燥中的应用三个方面综述了近年来物理场辅助渗透脱水技术的研究进展,总结其在果蔬加工应用中存在的问题。

1 果蔬渗透脱水机理及其传质效率影响因素

将果蔬浸入到渗透溶液中,由于果蔬细胞膜两侧存在溶液浓度差,造成果蔬脱水,当细胞膜两侧渗透压平衡,渗透脱水过程完成。图1为渗透脱水传质过程,由图可知,该过程产生了双向的质量传递:水分损失和固形物增益。水分损失即细胞中的水分在渗透压的作用下自发地向渗透液中的扩散过程;固形物增益即渗透溶液中的溶质向细胞内的反方向扩散过程。通过水分损失作用,可以降低果蔬的水分含量,减少果蔬中的生化反应延长保质期;通过固形物增益,则可以向果蔬中引入所需数量的活性物质、防腐剂、营养物质等,维持果蔬的组织结构,延长货架期。

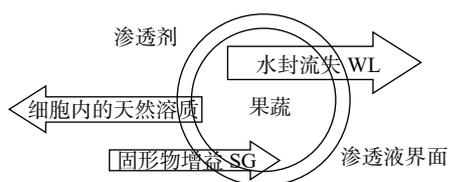


图1 渗透脱水传质过程

Fig.1 Mass-transfer process in osmotic dehydration

1.1 渗透脱水溶液组成对传质效率的影响

渗透脱水过程的主要驱动力是渗透脱水溶质所产生的渗透压差,故渗透脱水溶质是渗透脱水效率的主要影响因素之一。渗透脱水溶质必须具有较高的水溶性、较低的成本,并对最终产品的感官性能和稳定性有积极的影响^[6]。基于这些特点及物料特性,可供选择的溶质主要是蔗糖和氯化钠。大分子的蔗糖能提升渗透压,有利于渗透浸渍^[7],但在一些研究中发现高分子溶质与蔗糖溶液混合使用会使果蔬的脱水效应更强。Akharume等^[8]研究蔗糖溶液添加食品级的液态烟熏剂对渗透脱水的影响,结果表明,在蔗糖溶液中添加的液态烟熏剂可阻止细胞壁塌陷,改

变细胞结构,增加脱水率,从而提高传质效率。Maldonado等^[9]在研究菠萝的渗透脱水时加入了可溶性纤维,渗透溶液由23.3%的蔗糖、33.4%的可溶性纤维和3.3%的菊粉组成,实验进行2h,菠萝的水分损失可达到40%,比Silva^[10]在蔗糖溶液中加入4%氯化钙脱水菠萝的传质效率更高,且剩余渗透溶质残渣还可用来发酵饮料,不会造成资源浪费。

氯化钠溶液有助于果蔬保持颜色、风味和质地,降低果蔬水分活度延长保质期^[11]。在早期的渗透脱水研究中氯化钠主要用于肉类的渗透脱水^[12],近年来开始广泛地用于果蔬渗透脱水。作为渗透溶质,氯化钠的分子量(58 g/mol)相对于蔗糖分子量(342 g/mol)更小,因此氯化钠相对于蔗糖具有更高的渗透压,所以在果蔬渗透脱水研究中,将氯化钠添加到蔗糖溶液中以提升饱和溶液的渗透压。Derossi等^[13]采用响应面法和期望函数法研究了氯化钠、蔗糖复合溶液中樱桃番茄的渗透脱水过程,确定了满足脱水率、水分活度、红色素综合指标最优期望的渗透脱水条件是55.62%的蔗糖和2.45%的氯化钠和22h的脱水时间。

低分子量的氯化钠具有比大分子量的蔗糖更高的渗透压,因此在蔗糖溶液中添加氯化钠可有效地提升溶液的渗透压,提升渗透脱水效率。在蔗糖溶液中添加高分子活性物质能改善果蔬细胞结构,进而提升渗透脱水效率,故将两种或两种以上溶质混合使用可以取得更好的脱水效果。但蔗糖和氯化钠作为渗透脱水溶质会增加脱水产品的糖盐含量,与绿色健康食品的发展趋势不符,因此蔗糖和氯化钠替代溶质成为新的研究热点。另外,为了实现更高的效率及工业化,渗透溶液的循环利用也是需要解决的技术问题。

1.2 其他因素对传质效率的影响

物料表面积、物液比、搅拌强度、渗透溶液的温度、浓度等因素对脱水传质效率也有一定的影响。Ayse等^[14]在保证其他因素不变的情况下,减小杏桃尺寸,水分损失和固形物增益均有显著增加。这是因为固体尺寸较小时,扩散路径较小,传质效率提高。Song等^[15]在研究渗透脱水对黑莓的影响时表明,渗透溶液浓度梯度越大,渗透脱水初期扩散速率越大,然而随着梯度的增加渗透脱水达到平衡的时间就越长,传质效率越低,原因是随着浓度的增高,溶液的黏度和传质阻力也变大,阻碍了整个传质过程,故渗透溶液的浓度不能过高。Tonon等^[16]在研究温度、溶液组成和搅拌速度对渗透脱水番茄传质动力学的影响时表明,在脱水过程中适当搅拌可以减少或消除传质阻力;通过提升脱水温度可以降低溶液黏度和传质阻力,提升脱水效率,但过高的溶液温度(>60℃),会导致番茄风味恶化。

渗透脱水的过程非常缓慢,物料表面积、物液比、搅拌强度渗透溶液的温度、浓度等工艺参数的改变只能在有限范围内提高传质速率,超出一定限度,

即使水分迁移速率增大,也会对果蔬的品质产生一定不利的影响。

2 物理场辅助渗透脱水技术及动力学模型

在不显著影响果蔬品质的前提下,为克服渗透脱水固有传质速率慢的问题,学者提出一系列物理场辅助渗透脱水技术,主要有:超声波辅助技术、真空辅助技术、高静水压和高压脉冲电场辅助技术。物理场辅助渗透脱水过程流程如图 2 所示。

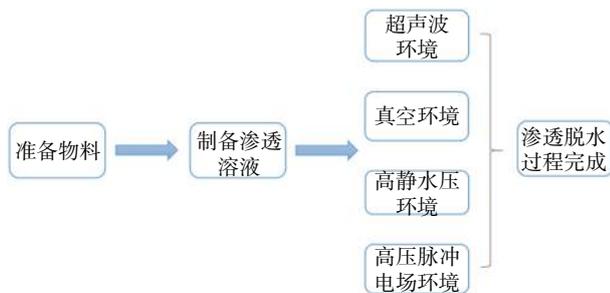


图 2 物理场辅助渗透脱水示意图

Fig.2 Physical field assisted osmotic dehydration

2.1 超声波辅助渗透脱水

超声波通过高频率的振动引起介质高速的压缩和膨胀^[17],该效应能够降低内部传质阻力,此外,超声波的空化效应可以降低外部传质阻力^[18]。超声波辅助渗透脱水技术(Ultrasound Assisted Osmotic Dehydration, UAOD)将超声波与渗透脱水结合在一起,可以在细胞中产生微观通道进而提高传质速率。这些通道最初由 Fabiano 等^[19]用显微镜观测到,由图 3 可知,微观通道是由于甜瓜果肉细胞受超声波作用发生形变而形成的,而细胞中的水分则可以利用这些通道作为一种更容易扩散到物料表面的途径,减小了传质阻力,加快了渗透脱水速率。

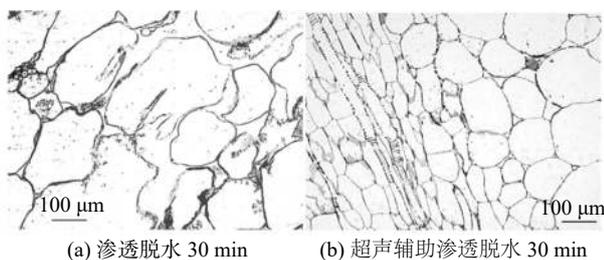


图 3 甜瓜立方体细胞显微图^[19]

Fig.3 Micro-graphs of melon cube cells^[19]

2.2 真空辅助渗透脱水

真空辅助渗透脱水(Vacuum Osmotic Dehydration, VOD)以压力梯度为驱动力:常压时,果蔬细胞孔隙被气体所占据,而处于真空环境时,孔隙外部压力减小,内部气体膨胀溢出;再次恢复常压时,新建立的压力梯度导致渗透溶液渗入到以前充满气体的孔隙内,既提高了失水速率,又增加了传质量,故该技术更有利于孔隙率较高果蔬的传质^[12]。真空的辅助作用只影响达到平衡时的速率,而不影响平衡含水量,又由

于通过气、液两相的交换,渗透溶液填满果蔬细胞的孔隙,增大了渗透溶液与细胞的接触面积,故真空下的总传质效率高于常压下的传质效率^[20],同时采取真空辅助技术可以较好地将渗透溶液中所加入的矿物质、维生素、抑制剂、抗菌剂等物质浸渍到果蔬中,以制备功能性强、质量稳定、品质新鲜的产品^[21]。

2.3 高静水压辅助渗透脱水

高静水压辅助渗透脱水(High Hydrostatic Pressure Osmotic Dehydration, HHP-OD)利用压力变化,使果蔬细胞壁和细胞膜分离,利用细胞膜半透性高,提高渗透脱水效率。在渗透脱水中施加高压和减压,与未进行高静水压处理的样品相比,渗透过程的水分损失、固形物增益都升高^[22]。该技术已被应用于提高迁移速率^[22],改善果蔬感官特性及品质^[23]等方面。影响高静水压辅助渗透脱水的因素主要有压力水平、压力保持时间及渗透溶质种类等。

2.4 高压脉冲电场辅助渗透脱水

高压脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)具有电场强度高,处理时间短(<300 μs)的特点^[24],是食品加工的新技术。果蔬渗透脱水预处理通常采用 1~5 kV/cm 的高压脉冲场强^[25]。高压脉冲电场可以对果蔬细胞的细胞膜造成破坏,促使微孔隙形成,因此可以提升具有蜡质表皮果蔬的渗透脱水效率。在高压脉冲电场处理下,可使蓝莓的细胞膜发生了断裂并形成气孔,从而增加水和溶质的扩散效率^[26]。

2.5 物理场辅助渗透脱水动力学模型

物理场辅助渗透脱水过程中水分迁移机制复杂,物料与渗透溶液间的传质受渗透溶液的浓度、温度、压力和物液比的影响,对传质动力学的渗入研究有助于渗透脱水在工业应用中以降低能耗和生产成本。因此,为了更好地描述物理场辅助渗透脱水过程,数学模型的建立是非常重要的,也是量化传质现象和评估过程效率的基本工具^[27]。

数学模型分为经验模型、理论模型和半理论模型。经验是指将过程变量与水分损失和固形物增益关联,不考虑水和溶质同时传输的潜在现象,包括多变量回归、响应面分析和质量平衡^[28]。理论模型是指表示传质过程中各变量之间关系的,由理论推导所得出的各变量的物理数学关系式^[29]。半理论模型通常是指由理论模型转换而来的多项式的扩散模型^[30]。常用动力学模型包括 Azuara 模型(经验模型)、Peleg 模型(经验模型)、Fick 第二定律(理论模型)和 Weibull 模型(经验模型)等,其具体应用见表 1。

Cheng 等^[31]研究了超声场和脉冲真空场对草莓渗透脱水过程中水的分布和状态的影响,利用 Peleg 模型计算了草莓的水分损失和固形物增益。Alam 等^[32]利用 Fick 定律研究金诺桔在蔗糖溶液中的渗透脱水过程,结果表明在渗透溶液温度为 65 ℃、蔗糖浓度为 65~75 Brix、物液比为 1:5、浸泡时间为 270 min 的条件下,金诺桔的水分损失较高,

表1 渗透脱水常用模型及其应用

Table 1 Common models and applications of osmotic dehydration

脱水果蔬	传质模型	物理场辅助技术	文献
草莓	Peleg模型	超声波、脉冲真空	[31]
黑墨籽	Peleg模型Weibull模型Fick第二定律	超声波、真空	[32]
木薯、猕猴桃	Azuara模型	超声波	[33-34]

最大水分扩散系数为 $5.308 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 固形物增益较低, 最小固形物扩散系数为 $0.49 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。Shama 等^[32] 研究超声波与真空预处理结合对黑墨籽果渗透脱水的影响, 利用 Peleg 模型预测渗透脱水过程中黑墨籽果水分和溶质含量的平衡值, 利用 Weibull 模型预测不同温度下渗透脱水过程中黑墨籽果的水分和溶质含量, 利用 Fick 第二定律计算了黑墨籽果的有效水分扩散系数。Pessoa 等^[34] 对木薯渗透脱水的动力学分析过程中利用 Azuara 模型拟合了水分损失和固形物增益的实验数据, 得到了良好的一致性。

物理场辅助渗透脱水经验模型和理论模型, 预测渗透果蔬渗透脱水过程具有较好的准确度, 但模型的应用需要针对具体的果蔬形状进行理论分析, 并利用实验数据进行拟合, 工作量较大, 适用范围较窄。

3 物理场辅助渗透脱水技术在果蔬干燥中的应用

物理场辅助渗透脱水技术, 可有效地提升果蔬渗透脱水效率, 是近年来研究的热点。

在超声波辅助渗透脱水方面, Sakooei 等^[35] 研究了超声波辅助渗透脱水对热风干燥杏的物理、结构和微观结构性能的影响, 结果表明, 超声波的应用改善了杏干的物理和纹理特性且杏干的硬度显著低于未经超声波处理的脱水样品。Prithani 等^[36] 分析了超声波对猕猴桃切片水分损失、固形物增益、有效水分扩散率和溶质扩散率的影响, 同时预测了渗透脱水过程中水分损失和固形物增益。Masztalerz 等^[37] 评价了不同超声波辅助条件对苹果片渗透脱水的影响, 超声辅助渗透脱水导致的水损失最大, 对脱水苹果片的品质也有一定的改善。Li^[38] 研究了超声辅助渗透脱水对三花李的影响, 结果表明超声辅助脱水显著提升了三花李的脱水效率。

在真空辅助渗透脱水方面, Junqueira 等^[39] 研究了真空压力对甜菜根、茄子和胡萝卜的水损失和固形物增益的影响, 结果表明, 与甜菜根相比, 真空条件对茄子和胡萝卜样品影响较大, 说明真空辅助对孔隙率较高的果蔬的传质更有利。为了进一步提升渗透脱水速率, Sharma 等^[33] 提出将超声波与真空结合起来辅助渗透脱水黑墨籽, 结果表明, 与真空预处理相比, 超声真空预处理样品的有效水分和溶质扩散系数最高, 同时产品的质量也得到了进一步的改善。

在高静水压辅助渗透脱水研究方面, Luo 等^[40] 研究了高静水压对乌梅果实渗透脱水机理及动力学的影响, 结果表明经高静水压处理后, 渗透溶液在乌

梅细胞内部重新分布, 高静水压提高了乌梅传质的初始速率、有效水分扩散系数和果实柔软度。Dash 等^[41] 利用高静水压辅助渗透脱水姜片, 研究表明在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 当压力从 0.1 MPa 升至 600 MPa , 有效水分扩散系数扩大了约 12 倍, 证明了压力的增加提升水分损失。

在高压脉冲电场辅助渗透脱水方面, Tylewicz 等^[42] 研究了高压脉冲电场辅助渗透脱水有机草莓和猕猴桃, 评估了高压脉冲电场预处理对有机草莓和猕猴桃渗透脱水传质效率, 颜色, 抗氧化剂和抗菌性能的影响。Nazari 等^[43] 利用响应面法优化了高压脉冲电场辅助渗透脱水苹果的工艺参数, 结果表明随着电场强度的增大, 脉冲持续时间的减小, 传质效率下降, 当脉冲数增大时, 水分损失和固形物增益增加。

超声波辅助渗透脱水果蔬, 可以在保持果蔬天然风味、颜色和营养成分的基础上, 同时增加果蔬水分损失和固形物增益、改善干燥果蔬的复水性能、增强其冻干后产品的色泽^[44-47]。但利用超声波辅助渗透脱水, 易使渗透溶液和脱水果蔬样品温度升高, 不利于脱水温度的控制, 因此不适用于热敏性果蔬。真空辅助渗透脱水适用于含水量较低, 果肉孔隙率较高的果蔬。高静水压辅助渗透脱水可以有效地提升果蔬渗透脱水效率, 但工艺复杂, 应用在不同渗透溶液中具有很大的差异性^[40]。高压脉冲电场辅助渗透脱水技术存在着设备昂贵、工艺参数复杂、应用成本高的缺点。近几年的研究表明, 多物理场组合辅助渗透脱水果蔬已经成为一种新的趋势。

4 结论

虽然物理场辅助渗透脱水果蔬具有脱水效率高、干燥效果显著等诸多优点, 但为了使物理场辅助技术在果蔬渗透脱水方面有更好的应用, 还存在一些问题亟待解决:

提高渗透脱水溶液的安全性和利用率。物理场辅助渗透脱水技术应用的渗透溶质多为蔗糖和氯化钠, 在提升水分迁移速率的同时也促使脱水溶质进入样品内部, 脱水果蔬多为高盐高糖产品, 在食品健康方面不具备优势, 因此需大力开发健康的替代渗透脱水溶液。在脱水过程中渗透脱水溶液的浓度和微生物含量都会发生变化, 因此能否循环利用是工业化渗透脱水过程中最重要的技术问题。近年来有学者提出, 采用多级渗透脱水^[48], 可以实现渗透脱水溶液再利用的目的, 但在实际应用中还有待考究。

扩大物理场辅助技术及其动力学模型的适用范围

围。由于果蔬微观结构及渗透溶质离子种类不同,每种辅助技术适用的果蔬种类有限,因此还需进一步探索物理场辅助技术的作用机理与效应,比如多物理场组合辅助渗透脱水,以更好对果蔬进行渗透脱水。虽然不同的物理场辅助渗透脱水数学模型已被开发,但模型的精度还受到样品形状和实验条件的限制,可结合多种模型,深入研究,提高其准确度与适用性。

参考文献

- [1] 常暖迎,郭新宇,肖冰.我国果蔬质量安全问题及解决措施[J].食品安全导刊,2015(33):30.
- [2] Nowacka M, Fijalkowska A, Dadan M, et al. Effect of ultrasound treatment during osmotic dehydration on bioactive compounds of cranberries[J]. *Ultrasonics*, 2018, 83: 18–25.
- [3] Dermesonlouoglou E K, Giannakourou M C. Evaluation and modelling of osmotic pre-treatment of peach using alternative agents in a multiple-component solution.[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2019, 99(3): 1240–1249.
- [4] 赵金红,温馨,彭郁,等.渗透压脱水前处理对芒果冻藏中品质变化的影响[J].现代食品科技,2014,30(5):225–231.
- [5] 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.
- [6] 蓝浩,周国燕.猕猴桃渗透脱水的响应面优化分析[J].吉林农业科学,2013,38(1):87–91.
- [7] Raoultwack A L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1994, 5(8): 255–260.
- [8] Akharume F, Singh K, Sivanandan L. Effects of liquid smoke infusion on osmotic dehydration kinetics and microstructural characteristics of apples cubes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 246: 51–57.
- [9] Maldonado R R, Ana Júlia Rocha Mendes Pedreira, Cristianini L B, et al. Application of soluble fibres in the osmotic dehydration of pineapples and reuse of effluent in a beverage fermented by water kefir[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 132: 109819.
- [10] Silva K S, Fernandes M A, Mauro M A. Effect of calcium on the osmotic dehydration kinetics and quality of pineapple[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 134(134): 37–44.
- [11] Alino M, Grau R, Baigts D, et al. Influence of sodium replacement on the salting kinetics of pork loin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(4): 551–557.
- [12] Renato D J J J, Correa, Jefferson Luiz Gomes, De Mendonça K S, et al. Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 10–18.
- [13] Derossi A, Severini C, Del Mastro A, et al. Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 641–648.
- [14] Ayse ispir, Inci Türk Togrul. Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2009, 87(2): 166–180.
- [15] Song C, Ma X, Li Z, et al. Mass transfer during osmotic dehydration and its effect on anthocyanin retention of microwave vacuum-dried blackberries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(1): 102–109.
- [16] Tonon R V, Baroni A F, Miriam D Hubinger. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(4): 509–517.
- [17] 魏彦君.南美白对虾超声波辅助热泵干燥动力学及品质特性研究[D].淄博:山东理工大学,2014.
- [18] 兰冬梅,许平,林晓岚,等.超声波辅助渗透脱水预处理的农产品干制研究进展[J].亚热带农业研究,2015,11(2):133–138.
- [19] Fabiano A N Fernandes, Maria Izabel Gallão, Sueli Rodrigues. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2007, 41(4): 604–610.
- [20] Rastogi N K, Raghavarao K S M S, Niranjana K. Chapter 11 - Recent developments in osmotic dehydration[M]. *Emerging Technologies for Food Processing (Second Edition)*, 2014: 181–212.
- [21] Fito P, Chiralt A, Betoret N, et al. Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering: Application in functional fresh food development[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2–3): 175–183.
- [22] Rastogi N K, Angersbach A, Knorr D. Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 45(1): 25–31.
- [23] Ragavan K V, Rastogi N, Srivastava A. Industrial food processing contaminants[M]. *Food Toxicology*, 2016: 359–432.
- [24] Jin T Z, Guo M, Zhang H Q. Upscaling from benchtop processing to industrial scale production: More factors to be considered for pulsed electric field food processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 72–80.
- [25] Artur Wiktor, Magdalena Sledz, Malgorzata Nowacka, et al. The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 69–78.
- [26] Ishfaq Ahmed, Ihsan Mabood Qazi, Suraiya Jamal. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 29–43.
- [27] Dimakopoulou-Papazoglou D, Katsanidis E. Osmotic processing of meat: mathematical modeling and quality parameters[J]. *Food Engineering Reviews*, 2020, 12(1): 32–47.
- [28] Assis F R, Rui M, Morais A. Mass transfer in osmotic dehydration of food products: comparison between mathematical models[J]. *Food Engineering Reviews*, 2016, 8(2): 116–133.
- [29] 李为强,宋亚.渗透脱水传质过程的国内外研究进展[J].辽宁化工,2016,45(4):507–511,515.
- [30] 王妮.莴笋渗透脱水传质动力学及渗后热风干燥特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [31] Cheng X F, Zhang M, Adhikari B, et al. Effect of power

- ultrasound and pulsed vacuum treatments on the dehydration kinetics, distribution, and status of water in osmotically dehydrated strawberry: A combined NMR and DSC study[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2014, 7(10): 2782–2792.
- [32] Sharma Maanas, Dash Kshirod K. Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 58: 104693.
- [33] Alam M S, Kaur M, Ramya H G. Mass transfer kinetics for osmotic dehydration of kinnow fruit in sugar solution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences India*, 2019, 89(1): 361–370.
- [34] Pessoa Thayze Rodrigues Bezerra, Lima A G Barbosa de, Martins Pierre Corre, et al. Osmotic dehydration of cassava cubes: Kinetic analysis and optimization[J]. *Diffusion Foundations*, 2020, 25: 99–113.
- [35] Sakooei-Vayghan R, Peighambaroust S H, Hesari J, et al. Properties of dried apricots pretreated by ultrasound-assisted osmotic dehydration and application of active coatings[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2020, 58(3): 249–259.
- [36] Prithani R, Dash K K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102407.
- [37] Masztalerz K, Lech K, Wojdyo A, et al. The impact of the osmotic dehydration process and its parameters on the mass transfer and quality of dried apples[J]. *Drying Technology*, 2020: 1–13.
- [38] Li L, Yu Y, Xu Y, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the drying characteristics and quality properties of Sanhua plum (*Prunus salicina* L.)[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021, 138: 110653.
- [39] Junqueira Joao Renato de Jesus, Jefferson Luiz Gomes Correa, Mendonca Kamilla Soares de, et al. Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: Effect of vacuum pressure on the quality parameters[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(10): 1863–1875.
- [40] Luo W, Tappi S, Wang C, et al. Study of the effect of high hydrostatic pressure (HHP) on the osmotic dehydration mechanism and kinetics of wumei fruit (*Prunus mume*) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(11): 2044–2054.
- [41] Dash K K, Balasubramaniam V M, Kamat S. High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 247: 19–29.
- [42] Tylewicz U, Oliveira G, Alminger M, et al. Antioxidant and antimicrobial properties of organic fruits subjected to PEF-assisted osmotic dehydration[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62: 102341.
- [43] Nazari A, Salehi M A, Abbasi Souraki B. Experimental investigation of effective factors of pulsed electric field in osmotic dehydration of apple[J]. *Heat & Mass Transfer*, 2019, 55: 2049–2059.
- [44] Simal S, José Benedito, Emma S Sánchez, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 36(3): 323–336.
- [45] Garcia-Noguera J, Oliveira F I P, Weller C L, et al. Effect of ultrasonic and osmotic dehydration pre-treatments on the colour of freeze dried strawberries[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2014, 51(9): 2222–2227.
- [46] Mehmet Baslar, Ömer Said Toker, Karasu S, et al. Ultrasonic applications for food dehydration[M]. 2016: 1247–1270.
- [47] 陈童, 张慤, 陈晶晶. 超声波辅助渗透脱水处理及其对西兰花冻结品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(4): 33–40.
- [48] Paula R Fernández, Lovera N, Ramallo L A. Sucrose syrup reuse during one- and multi-stage osmotic dehydration of pineapple[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(6): 13399.