果蔬干燥前处理技术的应用及研究进展

安可婧，魏来，唐道邦，余元善，卜智斌，张岩，徐玉娟
（广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510610）

摘要：目前，针对果蔬干制加工中存在的能耗高、时间长、营养成分损失严重等问题，主要通过干燥技术的创新以及干燥设备的研发予以不断改善，而干燥前处理技术在国内发展相对缓慢。干燥前处理技术是指通过物理、化学、生物等技术手段对物料进行处理，从而起到加快物料干燥速率、提高产品外观及营养品质、延长货架期的作用。目前常用的果蔬干燥前处理技术有：热烫、冻融、渗透、化学试剂、超声、超高压、高压脉冲电场、二氧化碳浸渍处理等。本研究针对上述几种前处理技术的原理、特点进行综述，对比不同前处理技术的作用机制及适用果蔬的种类，并展望了不同前处理技术的发展前景与趋势，以期为果蔬干燥新技术的研究与开发提供指导意见。

关键词：前处理技术；果蔬；渗透处理；超声波；高压脉冲电场；二氧化碳浸渍
文章篇号：1673-9078(2019)06-314-321 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.042

Application and Research Progress of Pretreatment Technology for Drying of Fruits and Vegetables

AN Ke-jing, WEI Lai, TANG Dao-bang, YU Yuan-shan, BU Zhi-bin, ZHANG Yan, XU Yu-juan
(Sericulture and Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture / Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: At present, there are many problems associated with drying of fruits and vegetables such as high energy consumption, long drying time, and severe loss of nutrients. Those problems have commonly been solved via the innovation of drying technology and development of drying equipment. However, the growth of technologies for pre-drying is relatively slow. The pre-drying treatment technology refers to the treatment of materials through using methods such as physical, chemical or biological techniques prior to drying to accelerate the drying rate, improve product appearance and nutritional quality, and extend shelf life of fruits and vegetables. Currently, the commonly used pre-drying treatment technologies include blanching, freezing and thawing, osmotic treatment, chemical reagents, ultrasonic treatment, ultra-high pressure, high-voltage pulsed electric field, and carbonic maceration. In this research, the principles and characteristics of the above pretreatment technologies were reviewed, the mechanisms and application scopes for different fruits and vegetables were compared, and the prospects and development trends for pre-drying treatment technologies were also presented in order to provide guidance for research and development of new technologies for drying of fruits and vegetables.

Key words: pretreatment technology; fruits & vegetables; osmotic treatment; ultrasound; high voltage pulsed electric field; carbonic maceration

随着现代化进程的加快和快节奏生活的到来，营养、健康、方便食品越来越受到人们的青睐，其中脱水果蔬因含有丰富的矿物质、膳食纤维以及独特的风味而深受人们的喜爱。然而，果蔬干燥普遍存在干燥时间长、能耗高、外观品质差、营养损失严重等问题。因此，在日益严峻的能源形势下，探讨如何在降低干燥能耗的同时提高产品品质具有重要的现实意义。

目前，解决我国果蔬干燥产业存在问题主要通过干燥技术的创新和设备的研发，而针对干燥前处理技

收稿日期：2018-11-01
基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFD0400900；2017YFD0400904）；广州市科技计划项目（201906010097）；广东省省级乡村振兴战略专项（农业产业发展）省级项目（粤农农计〔2018〕12 号）；国家自然科学基金项目（31501500）；CSC 资助项目（201808440029）
作者简介：安可婧（1985-），女，博士，副研究员，研究方向：农产品加工及贮藏
通讯作者：徐玉娟（1974-），女，博士，研究员，研究方向：农产品加工及贮藏

术的理论研究和产业开发远远不够[1~3]。干燥前处理技术是指通过物理、化学、生物等技术手段在干燥前对物料进行处理，从而起到加快物料干燥速率、提高外观和营养品质、延长货架期以及添加功能性成分的作用[2~4]。目前已有大量研究证实干燥前处理技术是解决果蔬干燥时间长、营养品质差的有效方法[5~11]，但对于不同干燥前处理技术的原理特点、适用的果蔬种类，以及发展应用前景还没有报道。因此，本文选择了几种常见的干燥前处理技术进行归类评述，并对其作用机制、适用范围以及发展趋势进行探讨，以期为干燥前处理技术在食品工业中的推广应用提供一定的理论参考。

1 干燥前处理技术的作用机制及应用

1.1 热烫处理

热烫预处理是将已切分或未切分的新鲜原料在温度较高的热水、沸水或常压蒸汽中进行热烫。高温热烫可以软化果蔬组织结构、提高细胞通透性、提升干燥速率、降低原料的不良风味和产品硬度。热烫预处理适于与多种干燥技术相结合。

Mulet 等[8]发现热烫处理可以增加生姜细胞膜通透性，经处理后干燥速率显著提高；马琴等[9]研究表明烫漂湿度和温度是影响枸杞干燥时间的关键因素，在温度 115 ℃、湿度 40%、时间 30 s 的烫漂条件下，干燥时间比未预处理样品缩短 4.75 h。然而，热烫处理并非适用于所有果蔬。Ando 等[10]发现对胡萝卜进行热烫处理，剩余的果胶甲酯酶活力有助于果胶交联结构的形成，从而抑制水分的迁移；芒果经热烫处理后体积收缩严重、细胞壁对水分通量阻力增大，水分有效扩散系数降低[11]。因此，热烫预处理应根据物料特性进行选择，不宜选择淀粉含量高、质构偏软、热敏性强的物料，适当的热烫预处理有利于降低果蔬含水率，提高产品膨化度和色泽品质。

目前还有很多新的漂烫预处理方法，如高温瞬时蒸汽漂烫、微波漂烫、常温酸漂烫、欧姆漂烫、超声波协同热漂烫和压热声处理等。随着干燥产业的迅猛发展，这些新型的漂烫技术将不断在果蔬干燥工业中得到应用，并朝着快速、节能和操作控制方便等方向发展。

1.2 冻融处理

冻融处理是指将物料在低温下冻结，然后在高温下解冻的过程。冻融处理通过改变果蔬水分的存在形式及溶质分布，从而影响物料的干燥特性及营养品质。

速冻过程产生的冰晶使细胞间隙增大、结构膨胀，而解冻过程中冰晶体的生长使果蔬的细胞壁、细胞膜等结构受到损伤，减少了内部水分扩散的阻力，从而提高了干燥速率。Ramírez 等[12]研究了漂烫、冻融和真空辅助渗透三种预处理对苹果热风干燥特性的影响，结果表明冻融处理后苹果片干燥速率最快。冻融处理对果蔬的质构及营养品质也有显著影响，毕金峰等[13]研究不同前处理方式对变温差膨化干燥哈密瓜质构的影响，发现冻融处理提高了产品的膨化度、硬度和脆度；Zhang 等[14]发现经过冻融处理后，壳聚糖的干燥时间显著缩短，非酶褐变降低，DPPH 自由基清除能力提高。

冻融处理未来将围绕组织学、蛋白质流变学、水分迁移学以及各指标之间的相关性来探讨物料在冻融过程中生物化学和物理化学的变化，了解物料在冻融处理过程中的品质变化规律，揭示冻融处理对果蔬结构及品质的作用机理。

1.3 渗透处理

渗透处理是指在一定温度下，将果蔬浸入高渗透压溶液中除去部分水分，同时引入少量溶质的过程。渗透脱水可在低温无相变条件下快速脱除水分，不但节能，而且有助于改善产品的组织结构、抑制酶促褐变、改变产品的贮藏特性等。渗透脱水的影响因素有很多，主要包括果蔬物料的形状、组织结构，渗透液的选择，渗透液浓度、温度，渗透时间以及辅助作用等。

果蔬物料与渗透液接触面积越大，脱水效果越明显。渗透液溶质分子量越小，产生的渗透压越大，电解质溶质的渗透压比非电解质的高。KOC[15]采用 30%的柠檬酸钠溶液和 60%的蔗糖溶液对豌豆进行处理，结果表明水分活度相当的条件下柠檬酸钠的脱水效率高于蔗糖溶液。另外，生姜、番茄等实验结果表明三元体系渗透溶液（盐+糖）的有效水分扩散速率高于二元体系[16,17]。一般说来，渗透溶液浓度越高，果蔬的失水量越大，其产品的固形物得率增加。然而当渗透液浓度达到某一值时，浓度再升高，固形物得率反而降低，这是因为渗透液浓度越高其黏度也越高，增加了传质阻力，阻碍了溶质的渗入[18]。渗透温度的升高也可以加快传质效率，但高温会影响果实组织结构，破坏细胞膜的半透性，导致溶质大量进入到果实内部。渗透时间对物料也有明显的影响，渗透时间越长，果蔬的失水量越大，但达到一定的渗透时间后，体系两相的浓度差变小，失水速度减慢。渗透时间过长会增加微生物污染的机率。渗透溶液与原料的质量比越大，

物料失去的水分对溶液浓度的影响越小，溶液渗透压越稳定，但渗透液的大量使用会造成成本的增加，因此，渗透过程要综合考虑效率和成本问题。

由于单一渗透处理，传质效率较慢，多采用搅拌、超声、真空、高压脉冲电场等技术辅助渗透。An 等[16]发现真空辅助渗透能够显著缩短干燥时间，提高其 Vc 保留率。Wang 等[19]采用超声波对红萝卜进行辅助渗透，发现超声波产生的空化效应使物料形成很多通道结构，从而显著减少了干燥时间，提高了 β-胡萝卜素含量和复水性。Yu 等[20]研究结果证实 PEF 处理可以显著加快蓝莓渗糖及脱水速率，提高产品的饱满度。

渗透脱水技术由于其操作简单、节省能耗、对物料品质具有良好的保护作用，适用于大部分果蔬。但目前渗透脱水技术在大规模工业化生产中还有许多亟待解决的问题：如渗透溶液的循环使用、微生物安全性以及辅助技术的工业化应用等。

1.4 化学试剂处理

化学试剂处理其原理是溶解果蔬表面蜡质层、改变果蔬表皮结构，从而减小水分的表面蒸发的阻力。部分试剂也可以起到抑制多酚氧化酶，防止酶促褐变，抑制微生物生长和抗氧化的作用。常用的化学试剂有乙醇、碳酸钾、氢氧化钠、柠檬酸、油酸乙酯、焦亚硫酸钠等（见表 1）。

赵海燕等[21]采用乙醇对茄子进行浸渍处理，发现适宜浓度的乙醇溶液能够提高茄子的干燥速率，改善其色泽品质。这是由于乙醇的沸点比水低，易挥发，干燥时受热迅速气化，体积膨胀对于扩充物料内部孔隙结构，促进水分迁移具有一定作用。此外，乙醇气化后形成的惰性环境有助于物料隔绝氧气，提升色泽品质[22]。对于表面具有蜡质层的果蔬，蜡质层的存在严重地阻碍了干燥过程中水分的蒸发。蜡质是由长链脂肪酸构成的醇类、烷烃、醛、酮和酯的复杂混合物，不溶于水，可溶于多种有机溶剂。Doymaz 等[23]发现油酸乙酯处理可以显著提高李子的干燥速率，干燥时间缩短 29.4%。Doymaz and Pala[24]采用油酸乙酯碳酸钾溶液处理无籽葡萄，发现其干燥速率显著高于单独碳酸钾溶液处理组和未处理组，且碱性油酸乙酯溶液处理的葡萄颜色品质最好。

化学试剂前处理可以显著提升果蔬干燥效率和色泽品质，但化学试剂处理仍然面临添加量的控制及废液排放等问题。虽然其具有低成本、易操作、效果显著等优势，但随着时代的发展，越来越多的绿色前处理技术将取代传统的化学试剂处理。

表 1 常用的化学试剂及其作用原理

Table 1 The common reagents and their principles in the pre-drying of fruits and vegetables

常用试剂	作用原理	研究对象	国家标准规定用量
乙醇	沸点比水低，易挥发，干燥时受热迅速气化，体积膨胀利于扩充物料内部孔隙结构，促进水分迁移。	茄子[21]、香蕉[22]	作为加工助剂，添加量无明确限制。
柠檬酸	抑制氧化酶活力，降低酶促褐变，保护色泽，提高营养品质，多作为酸味剂和抗氧化剂使用。	苹果[25]、竹笋[26]	按生产需要适量使用，添加量无明确限制。
碳酸钾	使角质层变薄或呈间断性分布，破坏了表皮细胞，从而加快了水分散失的速度。	金梅[27]	按生产需要适量使用，添加量无明确限制。用于干燥前处理的常用量为 50 g/kg[25]。
氢氧化钠	与碳酸钾作用类似。破坏表面蜡质层结构，破坏纤维结构，从而促进水分内部扩散及表面蒸发。	豌豆[28]	作为加工助剂，可在各类食品加工中使用，添加量无明确限制。
油酸乙酯	不溶于水，溶解于碱性溶液。碱性油酸乙酯可以溶解表面蜡质层结构，破坏表皮细胞，促进水分的散失，提高干燥速率[21]。	李子[23]、苦瓜[29]	饮料、冰淇淋、明胶和布丁中≤0.10 mg/kg；糖果中≤40 mg/kg；焙烤制品中≤55 mg/kg。
焦亚硫酸钠	可形成亚硫酸，在物料被氧化时将着色物质还原褪色，使物料保持鲜艳色泽，抑制氧化酶，防止物料腐败变质。	龙眼[30]、金针菇[31]	水果干中≤0.10 g/kg；干制蔬菜中≤0.20 g/kg；脱水马铃薯中≤0.40 g/kg；干制食用菌及藻类中≤0.05 g/kg。

1.5 超声波处理

超声波（Ultrasound）是超出人耳声音范围，频率大于 16 kHz 的一种声波。根据频率大小，超声波可分为高频率和低频率。低频超声波（20~100 kHz）可用作果蔬干燥前处理技术，其作用机理为：（1）对结构的影响：超声波作用使物料不断收缩和膨胀，形成海绵状结构。当这种结构效应产生的力大于保持毛细管内部水分的表面张力时，水分就容易通过微小管道转移出来[32]。（2）空化作用：在超声波压力场内，空化气泡的形成、增长和剧烈破裂以及由此引发的一系列理化效应，有助于除去与物料结合紧密的水分[33]。（3）

其他作用：超声波促进微细通道形成，减小传热表面层的厚度，提高对流传质效率[34]。目前，超声波作为果蔬干燥前处理技术的研究主要涵盖超声波对果蔬渗透脱水、干燥特性、营养品质、酶活力及微生物等的影响。

大量研究结果表明超声波处理可以提高渗透过程中果蔬失水率和固形物得率。在超声波作用下除水分更容易脱除外，悬浮固体和液体的边界扩散作用在超声场中被增强，使固形物得率显著增加[35]。但不同溶剂以及物料本身的微孔通道的数目、大小的不同，导致失水率和固形物得率有所差异。超声波辅助渗透也可与多种干燥方式结合，如热风干燥、冷冻干燥、微波干燥及红外干燥。Dehghannya 等[36]发现超声波前处理可以提高李子热风干燥的水分有效扩散系数，降低整体干燥时间。Fernandes[37]研究表明蒸馏水和低浓度渗透液更有助于超声波提高果实热风干燥速率，因为避免了高浓度溶液分子填充在微观孔隙通道中阻止水分的内部扩散。此外，超声波作用还可以显著降低冰晶尺寸[38]，提高果实和冷冻介质之间的传热系数，快速去除熔融显热和潜热，强化冷冻过程，从而提高冷冻干燥效率。

超声波处理也有助于提高干燥产品的营养及感官品质。Kadam[39]发现超声波预处理提高了褐藻的颜色保留率。Wang 等[19]研究证实超声波能够提高干燥胡萝卜的 β-胡萝卜素含量、复水性、颜色以及风味品质，电子鼻结果显示超声波处理后干燥胡萝卜的风味更接近于新鲜样品。Nascimento 等[40]发现超声波预处理可以显著减少百香果果皮总酚的损失，提高其抗氧化性。经超声波处理后水果的口感更接近于新鲜样品[34]。

此外，超声波还可以起到钝酶、杀菌、延长货架期的作用。超声波与压力（manosonic）、热量（thermosonic）、压力和热量（manothermosonic）以及抗菌剂的协同作用致死效果更加显著。超声波联合压力和热量（manothermosonic）可以显著提高辣根过氧化物酶、大豆脂肪氧化酶等的钝化速率[41]。Feng 等[42]的研究发现孢子、革兰氏阳性菌和球菌细胞对超声波的抗性作用大于植物性细菌、革兰氏阴性菌和杆状细菌。

超声波技术是一种简单易行、省时高效、成本低廉的非热前处理方式，不仅能提高果蔬渗糖及干燥过程中的传质传热效率，更有利于提高果蔬产品的营养及感官品质。但在产业化应用中，超声波很难产生足够强的超声场，以及供性能良好和方向精准的高功率及频率。

1.6 超高压处理

超高压技术（Ultra-high pressure processing，UHP）是以水或其它流体作为传递压力的介质，在高压（100 MPa 以上，常用 400~600 MPa）条件下作用一定时间，使生物体高分子中的氢键、疏水键、离子键等发生变化的一种技术。超高压可以使细胞膜破裂、蛋白质变性、淀粉糊化、酶失活、微生物菌体破坏而死亡，因此被广泛应用在杀菌、延长储藏期、改善物料的质构等方面。超高压作为干燥前处理技术在国外已有一些报道，但目前在我国还鲜有研究，其在果蔬干燥领域的研究如表 2 所示。

超高压技术可以加快果蔬在干燥过程中的传质传热效率，同时对物料的颜色、质构及货架期具有积极的影响，是一种良好的果蔬干燥前处理技术。但目前超高压对于果蔬干燥特性、营养及感官品质的作用机理还有待进一步挖掘，并且超高压设备成本高、能耗大，其产业化进程相对比较缓慢。

表 2 超高压技术在果蔬干燥领域的研究

Table 2 Study of ultra-high pressure in fruits and vegetables drying

原料	前处理技术	干燥技术	结论	参考文献
胡萝卜、苹果、青豆	超高压处理	热风隧道式干燥	处理压力超过 100 MPa 时，物料的干燥时间显著缩短，且细胞通透性增强，传质传热过程加快。	[43]
红甜椒	热烫、超高压、高压脉冲电场、酸、碱处理	流化床干燥	超高压处理比酸碱溶液处理干燥速率显著提高，与热烫处理相比没有显著差异，但热烫处理容易导致果蔬营养的损失。	[44]
芦荟	超高压、微波、热烫、酶处理	热风干燥	超高压技术可以加快物料干燥速率，提高水分扩散系数，还可以改善物料的质构，提高其抗氧化性。	[45]
马铃薯	超高压、热烫处理	热风干燥	经超高压处理的物料干燥前期速率显著提升，且质构和颜色与新鲜样品更接近。	[46]

1.7 高压脉冲电场处理

高压脉冲电场技术（Pulsed electric fields，PEF）的作用机理是外加电场可使膜内外电位差增大，当电位差高于细胞膜临界值时，细胞膜破裂，从而使细胞膜的通透性增强。因此，PEF 同样具有微生物致死和

钝化酶的作用。

Rastogi 等[47]在 1999 年第一次报道了 PEF 预处理显著提高胡萝卜渗透脱水和溶质渗入的效率。Yu 等[48]研究表明 PEF 可以克服表面蜡质层，提高蓝莓渗糖及脱水效率，其真空干燥时间可缩短一半以上。Parniakov 等[49]同样发现 PEF 可以提高苹果片的冷冻干燥效率，增加其孔隙率和复水性。PEF 可以在低温环境下破坏细胞膜结构，增加细胞通透性，提高果蔬渗糖及脱水速率，缩短干燥时间，同时能够钝化氧化酶活力，提高感官及营养品质，延长产品的货架期[50]。Yu 等[51]研究发现 PEF 联合温热预处理可以钝化蓝莓中的多酚氧化酶，降低蓝莓花青素的损失，同时有效控制了渗糖过程中霉菌及酵母菌的数量。但目前 PEF 技术仍存在着操作复杂，设备成本高、设备稳定性差等问题，产业化应用具有一定的局限性。

1.8 二氧化碳浸渍处理

1935 年法国人 Flanzy 提出了二氧化碳浸渍(Carbonic maceration，CM)的概念，最早将该技术应用于葡萄酒的酿造。葡萄浸渍在充满 CO_2 的密闭容器中进行厌氧代谢，CM 过程引发植物细胞一系列的结构变化和化学反应[52]。鉴于 CM 处理对细胞壁、细胞膜结构的改变以及胞内厌氧、酸性环境对营养成分的影响，人们设想 CM 是否可作为干燥前处技术被应用。

陶红燕[53]采用 CM 对红提进行处理，发现 CM 处理后红提热风和红外的干燥时间分别缩短了 65.15%和 71.95%。Liu 等[54]将红辣椒经 CM 处理后进行微波干燥，结果表明 CM 处理可使辣椒微波干燥速率提高 1.5~1.85 倍，且干燥后辣椒的总酚和 Vc 含量分别提高了 40%~60%和 121%~582%。An 等[55]采用 CM 对三华李进行处理，发现 CM 能够破坏三华李表面蜡质层，提高细胞膜渗透率，缩短干燥时间。此外，CM 可以显著钝化多酚氧化酶（PPO）和过氧化物酶（POD）酶，提高总花青素、总酚、总黄酮的含量以及总抗氧化性（ABTS）。

以上研究结果表明，CM 处理可以破坏果蔬表面蜡质层结构，造成细胞壁、细胞膜结构水解，增加细胞膜渗透率，从而提高果蔬干燥速率。CM 还可以钝化氧化酶活性，形成厌氧酸性环境，从而提升果蔬色泽及营养品质。CM 技术具有操作简单、低成本、低能耗、无废水排放、无化学试剂添加的优点，且二氧化碳气体可循环使用，符合绿色食品加工的理念，CM 技术具有产业化应用的前景。

2 几种干燥前处理技术作用机理及适用性比较

上述几种前处理技术根据其作用机理不同可以分为：化学、物理以及生化处理方式。其中化学前处理主要包括化学试剂处理，物理前处理方式主要包括渗透、热烫、冻融、超声波、超高压、高压脉冲电场处理等，而生化处理则包括二氧化碳浸渍处理。不同的前处理方式对果蔬具有不同的作用机制，对其能耗、干燥效率以及品质特性也有不同的影响。如渗透前处理通过降低物料初始含水量，提高干燥速率，从而达到节能提质的作用。冻融处理通过改变果蔬水分的存在形式及溶质分布，从而影响物料的干燥特性及营养品质。超声波、超高压、高压脉冲电场等处理是通过改变物料的细胞结构、增加细胞膜通透性，从而提高干燥效率，同时他们的钝酶、杀菌特性对产品感官、营养品质及延长货架期具有积极的影响。化学试剂处理通过溶解果蔬表面蜡质层、改变果蔬表皮结构，从而减小水分表面蒸发的阻力。二氧化碳浸渍则是通过引发植物细胞一系列的结构变化和化学反应，如对细胞壁、细胞膜结构的改变以及胞内厌氧、酸性环境对营养成分的影响，从而提高果蔬干燥速率，提升果蔬色泽及营养品质。

因此，干燥过程应根据果蔬物料的特性，选择适用的前处理技术以及干燥技术，进行综合考虑，采用合理的前处理工艺，才能达到人们所期望的效果。下面我们就典型的果蔬物料提出几点建议。针对具有蜡质层的果蔬（蓝莓、枸杞、李子），可以选择化学试剂、高压脉冲电场以及二氧化碳浸渍处理来破坏蜡质层的阻碍，提高水分蒸发效率，且二氧化碳浸渍更加适用于果肉致密、浆液较少的物料。针对需要渗糖（盐）的果蔬物料（芒果、苹果、木瓜、圣女果、毛豆、花生），渗透处理以及物理场（超声波、高压脉冲电场、二氧化碳浸渍）辅助渗透可以使细胞形成微孔道，快速脱出水分，同时使糖（盐）分子快速渗入到细胞组织中。针对热带亚热带水果（菠萝、芒果、荔枝、龙眼），高压脉冲电场、超声波等预处理方式可有效钝化氧化酶、提高微生物致死率，从而提高产品营养及感官品质、延长货架期。

3 结论与展望

3.1 在干燥前对果蔬进行预处理可以显著提高干燥效率，减少干燥时间，降低整个干燥过程的成本，同时也可以减少干燥过程对果蔬物料品质的破坏。要求预处理过程具有耗时短、能耗低、对果蔬物料破坏小的特点，预处理结合干燥技术与传统的单一干燥技术相比，显示出了巨大的作用。随着干燥前处理技术发展，无化学试剂添加，少废水废气排放的绿色加工技

术成为主流发展方向。前处理技术也由化学试剂处理向物理场处理、热处理向非热处理转变。此外，根据果蔬物料品种不同、细胞结构差异，可以将不同预处理技术进行组合，实现优势互补，最大程度的实现品质、效益最大化。未来干燥预处理技术的研究不再局限于对果蔬物料作用机理、能耗及营养品质的影响，更多的研究会投入到如何将预处理技术在工业规模上进行应用，设备的构建、成本的核算、精准调控等等。

3.2 综上，果蔬干燥前处理技术的未来发展趋势将围绕以下几点：（1）低成本、低能耗、少废水废气排放、无化学试剂添加的绿色食品加工方向发展。（2）结合国内外研究成果，克服预处理技术成本高、能耗大、稳定性差的问题，将实验室的小试前处理技术逐步向工业化、产业化迈进，实现智能操作、精准控制。（3）将单一要素控制逐步发展成多个要素控制，根据果蔬物料特点，将两种或两种以上的预处理方法相结合，优势互补，使预处理技术达到品质、能耗的最优效果。

参考文献

[1] 夏亚男,侯丽娟,齐晓茹,等.食品干燥技术与设备研究进展[J].食品研究与开发,2016,7(4):204-208
XIA Ya-nan, HOU Li-juan, QI Xiao-ru, et al. Research progress of food drying technology and equipment [J]. Food Research and Development, 2016, 7(4): 204-208

[2] 李红娟,张茜,杨旭海,等.果蔬预处理现状分析及未来发展趋势[J].江苏农业科,2015,43(5):271-272,361
LI Hong-juan, ZHANG Qian, YANG Xu-hai, et al. Current situation analysis and future development trend of fruit and vegetable pretreatment [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 271-272, 361

[3] 吴阳阳,李敏,关志强,等.预处理方法在食品冷冻干燥中的应用分析[J].食品研究与开发,2015,36(9):135-140
WU Yang-yang, LI Min, GUAN Zhi-qiang, et al. Application of pretreatment method in food freeze-drying [J]. Food Research and Development, 2015, 36(9): 135-140

[4] Silva G D D, Barros Z M P, Carvalho C B O D, et al. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 114-119

[5] García P. Osmotic dehydration of Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 154-160

[6] An K J, Wu J J, Tang D B, et al. Effect of Carbonic maceration (CM) on mass transfer characteristics and quality attributes of Sanhua Plum (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. Food Science and Technology, 2017, 87: 537-545

[7] Yu Y S, Jin T Z, Fan X T, et al. Osmotic dehydration of blueberries pretreated with pulsed electric fields: Effects on dehydration kinetics, and microbiological and nutritional qualities [J]. Drying Technology, 2017, 35(13): 1543-1551

[8] Mulet A, Bon J, Malonda J E C, et al. Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying [J]. Food Science and Technology International, 2006, 12(4): 315-323

[9] 马琴,谢龙,高振江,等.气体射流冲击烫漂预处理对枸杞干燥的影响[J].食品科技,2013,38(10):83-88
MA Qin, XIE Long, GAO Zhen-jiang, et al. Effects of air-impingement jet blanching pretreatment on drying *Lycium* [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(10): 83-88

[10] Ando Y, Maeda Y, MizutaniK, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 71: 40-46

[11] Nieto A, Castro M A, Alazamora S M. Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(3): 175-185

[12] Ramírez C, Troncoso E, Muñoz J, et al. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(3): 253-261

[13] 毕金峰,方芳,丁媛媛,等.预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响[J].食品与机械,2010,26(2):15-18
BI Jin-feng, FANG Fang, DING Yuan-yuan, et al. Effect of different pretreatments on the product quality of explosion puffing drying for Hami-melon [J]. Food & Machinery, 2010, 26(2): 15-18

[14] Zhang W, Xia W. Effect of Freeze-thaw pretreatment on thermal drying process and physicochemical properties of chitosan [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 131(21): 8558-8572

[15] Koc M, Baysan U, DeyserenE, et al. Effects of different cooking methods on the chemical and physical properties of carrots and green peas [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42: 109-119

[16] An K J, Li H, Zhao D D, et al. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of Cherry Tomatoes [J]. Drying Technology, 2013, 31(6): 698-706

[17] An K J, Ding S H, Tao H Y, et al. Response surface

optimisation of osmotic dehydration of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48: 28-34

[18] Yadav A K, Singh S V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 1654-1673

[19] Wang L, Xu B G, Wei B X, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 619-628

[20] Yu Y S, Jin T Z, Xiao G S. Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 41(6): 3303

[21] 赵海燕,方小明,王军,等.乙醇浸渍对切片茄子干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(9):233-240
ZHAO Hai-yan, FANG Xiao-ming, WANG Jun, et al. Effect of ethanol dipping pretreatment on drying characteristics and quality of eggplant slices [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 233-240

[22] Corrêa J LG, Braga A M P, Hochheim M. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas [J]. Drying Technology, 2012, 30(8): 817-826

[23] Doymaz I. Effect of dipping treatment on air drying of plums [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(4): 465-470

[24] Doymaz I, Pala M. The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(4): 413-417

[25] 李新明,张茂,张俊.无硫复合护色剂抑制干制苹果片褐变机理研究[J].北方园艺,2013,5:138-141
LI Xin-ming, ZHANG Mao, ZHANG Jun. Inhibitory mechanism of sulfur-free complex color-protective reagents against drying 'Fuji' apple slices brown [J]. Northern Horticulture, 2013, 5: 138-141

[26] 刘翔,叶麟,申光辉,等.真空冷冻干燥笋干加工工艺优化研究[J].食品与发酵科技,2017,53(6):53-57
LIU Xiang, YE Lin, SHEN Guang-hui, et al. Study on optimization of vacuum freeze-drying process for bamboo shoots [J]. Food and Fermentation Technology, 2017, 53(6): 53-57

[27] Ozdemir Y, Ozturk A, Tüfekçi S. Effect of two dipping pretreatment on drying kinetics of golden berry (*Physalis peruviana* L.) [J]. African Journal of Agricultural Research, 2016, 11(1): 40-47

[28] 杜卫华,杨性民,肖功年,等.改善真空冷冻干燥豌豆复水性的工艺研究[J].食品科技,2006,31(2):28-32
DU Wei-hua, YANG Xing-min, XIAO Gong-nian, et al. Research on modifying rehydration of freezedrying pea [J]. Food Science and Technology, 2006, 31(2): 28-32

[29] Srimagal A, Mishra S, Pradhan R C. Effects of ethyl oleate and microwave blanching on drying kinetics of bitter gourd [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(5): 1192-1198

[30] 卜智斌,唐道邦,徐玉娟,等.不同护色剂对龙眼原浆色泽和多酚含量的影响[J].食品科学,2013,34(24):289-293
BU Zhi-bin, TANG Dao-bang, XU Yu-juan, et al. Effects of different browning inhibitors on color and polyphenols of Longan puree [J]. Food Science, 2013, 34(24): 289-293

[31] 孙永泰.金针菇的保鲜及加工技术[J].山东食品科技,2004,6(8):9
SUN Yong-tai. Preservation and processing technology of velutipes [J]. Shandong Food Technology, 2004, 6(8): 9

[32] Siucińska K, Konopacka D. Application of ultrasound to modify and improve dried fruit and vegetable tissue: A review [J]. Drying Technology: An International Journal, 2014, 32(11): 1360-1368

[33] Rodríguez Ó, Eim V, Rosselló C, et al. Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: Effects on quality [J]. Journal of Science and Food Agriculture, 2018, 98(5): 1660-1673

[34] Fan K, Zhang M, Mujumdar A S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39: 47-57

[35] Amami E, Khezami W, Mezrigui S, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 36: 286-300

[36] Dehghannya J, Gorbani R, Ghanbarzadeh B. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of Mirabelle Plum [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2710-2717

[37] Fernandes F A N, Oliveira F I P, Rodrigues S. Use of ultrasound for dehydration of Papayas [J]. Food & Bioprocess Technology, 2008, 1(4): 339-345

[38] Xu B G, Zhang M, Bhesh B, et al. Influence of power ultrasound on ice nucleation of Radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 46: 1-8

[39] Kadam S U, Tiwari I 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(23): 302-307

[40] Nascimento E M G C do, Mulet A, Ascheri J L R, et al. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 170: 108-118

[41] Awad T S, Moharram H A, Shaltout O E, et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review [J]. Food Research International, 2012, 48: 410-427

[42] Feng H, Yang W, Hielscher T. Power ultrasound [J]. Food Science & Technology International, 2008, 14(5): 433-436

[43] Yucel U, Alpas H, Bayindirli A. Evaluation of high pressure pretreatment for enhancing the drying rates of carrot, apple, and green bean [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(2): 266-272

[44] Bio A O, Rastogi N K, Angersbach A, et al. Effects of high hydrostatic pressure or high intensity electrical field pulse pre-treatment on dehydration characteristics of Red Paprika [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001, 2(1): 1-7

[45] Vega-Galvez A, Uribe E, Perez M, et al. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on drying kinetics, antioxidant activity, firmness and microstructure of Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(2): 384-391

[46] Ai-khuseibi M K, Sablani S S, Perera C O. Comparison of water blanching and high hydrostatic pressure effects on drying kinetics and quality of potato [J]. Drying Technology, 2005, 23(12): 2449-2461

[47] Rastogi N K, Eshtiaghi M N, Knor R D. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots [J]. Journal of Food Science, 1999, 64(4): 1020-1023

[48] YuY S, Jin T Z, Fan X T, et al. Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments [J]. Food Chemistry, 2017, 239: 1219-1225

[49] Parniakov O, Bals O, Lebovka N, et al. Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 35: 52-57

[50] Wiktor A, Nowacka M, Dadan M, et al. The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot [J]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1286-1296

[51] Yu YS, JinT Z. Fan X T, et al. Osmotic dehydration of blueberries pretreated with pulsed electric fields: Effects on dehydration kinetics, and microbiological and nutritional qualities [J]. Drying Technology, 2017, 35(13): 1543-1551

[52] Liu L J, Wang Y X, Zhao D D, et al. Effect of carbonic maceration pre-treatment on drying kinetics of Chilli (*Capsicum annuum*, L.) flesh and quality of dried product [J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2516-2527

[53] 陶红燕.不同预处理对红提干燥特性及产品品质的影响[D].北京:中国农业大学,2013
TAO Hong-yan. Effect of different pretreatments on drying characteristics and product quality of red raisin [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013

[54] 刘沫茵,汪政富.二氧化碳浸渍条件对葡萄成分的影响[J].中国酿造,2011,235(10):142-144
LIU Mo-yin, WANG Zheng-Fu. Effect of carbon dioxide fermented condition on compositions of grapes [J]. China Brewing, 2011, 235(10): 142-144

[55] An K J, Wu J J, Tang D B, et al. Effect of carbonic maceration (CM) on mass transfer characteristics and quality attributes of Sanhua Plum (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 537-545

（上接第 206 页）

[25] 卢星达,汪建明,马晓蕾.响应面法优化普鲁兰多糖发酵培养基[J].中国食品添加剂,2012,s1:159-163
LU Xing-da, WANG Jian-ming, MA Xiao-lei. Optimization of fermentation medium for pullulan production by response surface methodology [J]. China Food Additives, 2012, s1: 159-163

[26] 朱艳杰,胡华新,杨华,等.响应面法优化养殖大黄鱼蛋白质提取工艺[J].食品安全质量检测学报,2016,7(10):4082-4090
ZHU Yan-jie, HU Hua-xin, YANG Hua, et al. Optimization of the extraction process of cultured *Pseudosciaena crocea* protein by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(10): 4082-4090

[27] Zeng X, Small D P, Wan W. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(3): 506-513