

农产品保鲜与食品包装

## 真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状

吴雨豪<sup>1,2</sup>, 吕瑞玲<sup>1,2</sup>, 周建伟<sup>2,3</sup>, 陈健乐<sup>1,2</sup>, 刘东红<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058;

2. 浙江大学宁波研究院, 浙江 宁波 315100; 3. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** **目的** 为未来冻干技术在果蔬类及更多食品种类中更广泛的运用提供参考。**方法** 对近些年来真空冷冻干燥技术在果蔬类食品中的应用进行综述, 探讨冻干过程中可能存在的问题, 以及一些工艺优化措施。**结论** 尽管真空冷冻干燥技术的用价高昂, 但近些年来由于消费者对少加工、高质量食品的需求, 该项技术在食品行业中得到了愈发广泛的应用。近年来, 预处理及一些创新技术的工艺强化能够有效地应对真空冷冻干燥技术面临的挑战, 随着在线监控、品质智能监测等技术的引入, 真空冷冻干燥得到了进一步的发展。

**关键词:** 真空冷冻干燥; 果蔬加工; 应用现状; 综述

**中图分类号:** TS205.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)07-0085-11

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.010

## Application Status of Vacuum Freeze Drying Technology in Fruit and Vegetable Processing

WU Yu-hao<sup>1,2</sup>, LYU Rui-ling<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian-wei<sup>2,3</sup>, CHEN Jian-le<sup>1,2</sup>, LIU Dong-hong<sup>1,2</sup>

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Zhejiang Ningbo 315100, China;

3. NingboTech University, Zhejiang Ningbo 315100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide reference for the future application of freeze drying technology in fruits, vegetables and more kinds of food. The application of vacuum freeze drying technology in fruits and vegetables in recent years was reviewed, and the possible problems in the freeze drying process and some measures to strengthen the freeze drying process were discussed. Although vacuum freeze drying technology is regarded as one of the most expensive dehydration methods, in recent years, due to the demand of consumers for less processing and high-quality food, this technology has been more and more widely used in the food industry. In recent years, the challenges faced by vacuum freeze drying technology have been effectively solved through pretreatment and process strengthening of some innovative technologies. With the introduction of online monitoring, intelligent quality monitoring and other technologies, vacuum freeze drying has been further developed.

**KEY WORDS:** vacuum freeze drying; fruit and vegetable processing; application status; review

收稿日期: 2022-08-18

基金项目: 宁波市公益类科技计划 (2021S054)

作者简介: 吴雨豪 (1998—), 男, 硕士生, 主攻赤松茸冻干及食品微生物灭菌。

通信作者: 刘东红 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工新技术、传统食品工业化、食品加工过程优化与控制、食品安全检测、质量控制和保证。

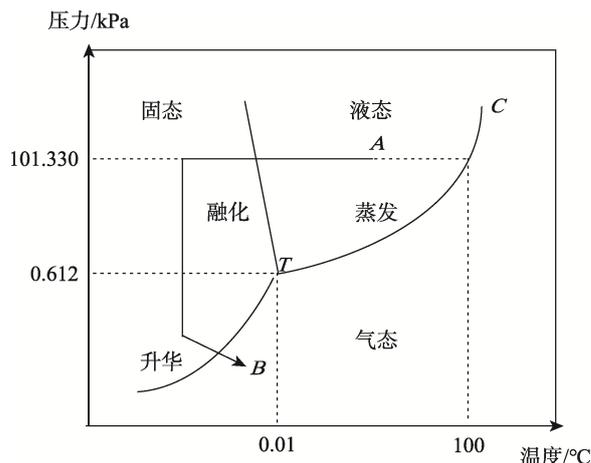
果蔬类食品包括水果、蔬菜、豆类、植物香辛料等,具有极高的营养价值。果蔬的水分含量较高,可为人类提供丰富的维生素、无机盐和膳食纤维等营养成分,长期食用果蔬有助于预防心血管疾病、癌症等重大疾病。世界卫生组织和粮食及农业组织的联合报告也显示,每天食用400g以上果蔬,不仅有助于减少微量营养素缺乏等症状,同时也能减少慢性疾病的发生<sup>[1]</sup>。由于果蔬的含水量较高,因此难以长期维持其新鲜状态。对于一些欠发达地区,冷鲜保存具有一定困难,因此果蔬类食品的干燥保存意义重大。

真空冷冻干燥技术也称冻干技术,作为一种高质量的干燥方式,在食品生产中已得到了广泛运用。冻干技术是利用原料中水分升华原理,通过真空处理将物料冷冻至共晶点温度以下,并最终升华以除去物料中水分的干燥方法<sup>[2]</sup>。由于干燥过程在低温和真空条件下进行,因此对于一些含热敏性化合物和易氧化成分的食物来说,真空冷冻干燥是首选的干燥方式。由于水分以固体状态直接升华,因此产品的色泽、质构和形状基本不变,同时可最大程度地保留食品原料中维生素、矿物质、蛋白质和酚类等营养成分<sup>[3]</sup>。尽管冻干过程耗时长、耗能较大,且工艺较为昂贵,但与其他干燥技术相比,真空冷冻干燥能最大程度地保留食品的质量,因此被广泛用于生产高价值食品。近年来,为了克服真空冷冻干燥方法的缺点,已经开展了多种加工工艺的优化策略研究,如样品预处理方式的选择及使用联合干燥技术等,包括真空冷冻联合干燥与微波、热泵、热风、压差闪蒸等技术的联合处理。

目前,真空冷冻干燥技术已在食品行业中广泛运用,文中主要综述该技术在果蔬类食品中的研究进展和应用现状,指出其中的加工技术难点,并探讨加工工艺优化措施,旨在为真空冷冻干燥技术的发展提供参考和思路。

## 1 真空冷冻干燥技术原理

水、冰和水蒸气在三相点共存,冻干技术的基本原理在于水的三态变化。水的三相变化如图1所示,曲线显示了水从固体到气态阶段(升华过程)、从液态到气态阶段(蒸发阶段)和从固态到液态阶段(融化阶段)的过程。图1中的 $T$ 点表示水在 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.612\text{ kPa}$ 下的三相平衡点, $C$ 点为水的临界点( $374\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $22\ 060\text{ kPa}$ )。在温度低于 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,物料完成冻结过程;当环境内的水蒸气压低于 $0.612\text{ kPa}$ 时,物料中的水分会直接升华,形成水分含量极低的冻干制品。如图1所示,从 $A$ 到 $B$ 的路径为样品的冻干流程,首先降低产品的温度,完成冷冻,接着将环境压力降至低于三相点对应的压力,最后提供一些热量,帮助水分从固态直接升华成气态<sup>[4]</sup>。



注:  $T$ 为水的三相点,  $C$ 为水的临界点,  $A$ 为真空冷冻干燥前的起点,  $B$ 为升华过程的终点。

图1 水的三相图

Fig.1 Three phase diagram of water

真空冷冻干燥流程主要分为3个阶段:预冻阶段、升华干燥阶段(第1阶段干燥)、解析干燥阶段(第2阶段干燥)<sup>[5]</sup>。

预冻阶段是真空冷冻干燥过程中的第1个步骤,使食品材料冻结固化,根据不同物料各自的共融点确定合适的冻结温度。冻结速率影响冰晶体的尺寸,冻结速度越慢,则产生的冰晶体越大,物料会形成较大的孔状结构,有利于水分的升华,从而增加干燥速度;反之,冻结速度越快,则形成的冰晶越小,对物料结构的影响也越小。然而,过大的冰晶也会影响细胞的原始结构,对物料的生物活性物质和组织结构会产生一定程度的破坏<sup>[6]</sup>。

在升华干燥阶段(第1阶段干燥),首先需要对环境施加真空,接着提高温度,使物料开始升华,以去除物料中处于冻结状态的游离水,产品的温度要比瘪塌时的温度低 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>。瘪塌温度指产品在真空冷冻干燥过程中失去宏观结构的临界温度,可以使用冻干显微镜确定,也可以用玻璃化转变温度估计该数值。有时,由于样品的组成成分不同,物料的玻璃化转变温度会比瘪塌温度低 $2\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。

在升华干燥完成后,还有部分吸附在物料上的结合水需要通过解析干燥(第2阶段干燥)逸出。该阶段是冷冻干燥中较为缓慢的一部分,可能比升华干燥多出30%的时间<sup>[4]</sup>。通过进一步升高温度,完成解析干燥过程,将第1阶段未去除的结合水升华去除,要求温度低于物料的玻璃化转变温度。

## 2 冻干技术在果蔬类食品加工中的应用

### 2.1 水果

水果富含维生素和氨基酸,是人的重要营养物

质来源,可分为浆果类、瓜果类、仁果类、柑橘属、核果类等。通过真空冷冻干燥处理后的冻干,不仅满足了全年的饮食需求,同时也极大程度地保留了水果中的营养成分,因此研究意义重大。目前,针对水果冻干工艺的研究多聚焦于与其他干燥手段的优势比较、最佳工艺参数的确定,以及对提升产品品质、生产效率的探究。

### 2.1.1 浆果类

浆果类水果的果皮薄且果肉多汁,含有多种营养成分。研究发现,经真空冷冻干燥处理后蓝莓的复水性较好,相较于热风干燥获得的制品,其总花色苷、总酚和Vc等含量更高,且在复水性、感官品质方面优势明显<sup>[9]</sup>。目前,也有研究团队对草莓的冻干工艺进行了优化。郭建业等<sup>[10]</sup>通过正交试验,发现草莓片在-35℃下预冻2h后,经-25℃/10h、-5℃/10h两阶段的解析干燥和15℃/11h、40℃/10h两阶段的升华干燥后,其冻干效果最佳,所制草莓冻干片的口感爽脆、色泽饱满,保留了草莓原有的形状和香味。与热风干燥技术相比,冷冻干燥不仅能预防褐变反应的发生,且干燥后草莓的颜色更加饱满,能更好地保持草莓表面的红色与内部的黄色<sup>[11]</sup>。

香蕉与火龙果同属于热带水果,长期保鲜较为困难,如何在保证其营养物质不损失的同时降低生产成本是一项难题。李宝玉<sup>[12]</sup>研究了不同干燥方式对香蕉品质的影响,结果表明,真空冷冻干燥能更好地保留香蕉中的酯类物质和各种营养成分,但采用该技术生产香蕉冻干存在投资大、生产周期长等问题。在不同的冷冻干燥周期下,香蕉的质地有所差别。通过多次不同的真空冷冻干燥循环发现,如果样品的循环时间过长,更易影响其组织结构。为了获得最佳品质的香蕉冻干,应当缩短干燥周期,同时也有效地降低了生产成本<sup>[13]</sup>。提升冻干果蔬资源利用率也是另一种降低成本的方式。郭玉霞等<sup>[14]</sup>通过在冻干火龙果脆片过程中添加火龙果皮,达到了该目标。经对比发现,与未添加果皮的对照组相比,添加果皮后火龙果脆片的微观孔隙数量增多、孔径减小,同时抗氧化性增强了18.43%~74.17%,感官评价显示无显著差异。这说明添加果皮的重组脆片工艺在维持感官品质和改善营养目标的前提下,显著提高了火龙果的资源利用率。

### 2.1.2 瓜果类

瓜果类水果是一种由坚硬外表皮保护的甜味水果,包括哈密瓜、西瓜、香瓜等。由于哈密瓜的含水量、含糖量较高,且采摘期集中、货架期短,使其在运输及销售过程中易发生霉变和腐烂,影响其口感及价值。通过真空冷冻干燥等一系列干燥技术可有效延长该类瓜果的货架期,降低其贮运成本。将真空冷冻与热风干燥进行对比发现,真空冷冻干燥产品的色泽优于热风干燥产品的色泽,同时产品中的总酚、总黄

酮含量较高,较好地保持了其细胞结构框架<sup>[15]</sup>。杨慧等<sup>[16]</sup>采用真空冷冻-变温压差膨化联合干燥技术对哈密瓜进行了处理,进一步提高了哈密瓜的干燥品质。采用联合干燥技术,并优化其工艺参数,有助于推动加工瓜果类水果脆片的技术升级和品质提升。

### 2.1.3 仁果类

仁果即是含有果仁的水果,常见的仁果类水果包括苹果、梨子、枇杷等。为了促进高质量黄冠梨干制产品的生产,宋娟等<sup>[17]</sup>以新鲜黄冠梨为原料,探究不同干燥处理对黄冠梨的主要风味物质及生化成分的影响。结果表明,真空冷冻干燥方式对其色泽、抗坏血酸、总酚和总黄酮的保护效果最好,干燥造成的损失不大。尽管酯类等物质明显减少,但是醛类、酮类和醇类等挥发性物质增长显著,其风味优于经热风和太阳能干燥后的产品。

Dalmau等<sup>[18]</sup>研究发现,在冻干后苹果的微观结构和初始成分发生了变化,真空冷冻干燥降低了其总多酚含量和抗氧化活性。在液氮中冷冻时,槲皮素衍生物的降解速率较低,苹果切片的整体颜色变化较低,气孔率较高,收缩率较低<sup>[19]</sup>。通过联合干燥方式也可有效提升冻干苹果片的品质。马友川<sup>[20]</sup>针对冻干苹果片硬脆性不佳、吸湿性强、干燥能耗高等问题进行了研究,结果表明,采用热泵联合真空冷冻干燥技术可更好地保持苹果的质构,保留绿原酸等主要酚类物质,制得冻干产品的香味更接近新鲜苹果的香味。

### 2.1.4 柑橘类

柑橘类水果主要有柑、橘、甜橙、柚子、金柑、柠檬等,该类水果的水分充足、营养丰富、口味鲜美。其中,柑橘的产量居百果之首,是我国消费者水果消费的重要组成部分。柑橘具有皮薄多汁的特点,这给贮运带来了困难。为了探究最佳工艺,袁小峰等<sup>[21]</sup>利用正交试验对蜜柚的真空冷冻干燥工艺参数进行了优化,采用综合评分法对蜜柚的含水率、色差、复水性和干燥速率4个指标进行了归一化处理,并计算确定了干燥工艺的最佳参数组合。结果表明,预冻温度对干燥效果的影响最大,这为蜜柚的实际生产提供了一定的参考。

### 2.1.5 核果类

核果类水果的果核有着坚硬的外壳,里面长有果仁,常见的品种包括桃、杏、枣、芒果、樱桃、橄榄等。黄忠闯等<sup>[22]</sup>研究了不同干燥方式对芒果品质的影响,相较于热风干燥,在真空冷冻干燥条件下,冻干芒果的Vc、总糖和蛋白质的保留率和复水率都更高,组织破坏程度较低。Salazar等<sup>[23]</sup>研究了芒果切片在冷冻干燥过程中的复水能力、总色差和多酚含量的变化情况,结果表明,通过选择恰当的操作条件对芒果片进行冷冻干燥,能有效缩短约30%的总加工时间,实现了高效生产,并减少了对环境的影响。

桂青等<sup>[24]</sup>研究了晒干、熏硫干燥、真空冷冻干燥和50℃热风干燥4种不同方式对五指毛桃品质的影响。通过气相色谱-质谱(GC-MS)分析可知,采用真空冷冻干燥技术,其五指毛桃样品中挥发性成分的相对含量最低,说明其他几种热干燥方式不利于保留热不稳定的物质。由于在加热过程中还可能产生新的物质,因此体现了真空冷冻干燥这一非热技术的优势。

## 2.2 蔬菜

蔬菜富含维生素和矿物质,可以提高身体免疫力,预防疾病的发生,是人们日常饮食中不可或缺的部分。蔬菜商品按其主要生物学特性、食用器官的不同,可分为十几个大类,包括叶菜类、花菜类、食用菌类、根茎类、豆荚类、瓜类等。通过真空冷冻干燥技术可有效地保留蔬菜中的营养成分,而制成的冻干也得益于其独特的口感,受到市场的欢迎。

### 2.2.1 叶菜类

叶菜作为食品中种类最多的一类蔬菜,是人体中维生素B1、维生素B2、维生素C、胡萝卜素,以及钙、铁、钾等元素的重要来源,其叶酸含量也较丰富。由于叶菜的含水量较高,因此给储存运输带来了一定的困难。柳蒿菜分布于我国东北及内蒙古地区,是民间喜食的山野菜之一,具有重要的食用和药用价值。研究表明,真空冷冻干燥技术能使柳蒿芽干料复水后极大程度地保有其原本质构,不仅延长了其储藏期,且复水性强,能最大限度地恢复原有的色、香、味<sup>[25]</sup>。刘媛媛等<sup>[26]</sup>通过单因素和响应面试验优化了柳蒿芽的加工工艺,得到了真空冷冻干燥柳蒿芽的最佳加工工艺,为今后的工业化应用提供了参考。

### 2.2.2 花菜类

花菜类蔬菜包括黄花菜、西兰花、青花菜、紫花菜、黄花菜、橙花菜等。如果不及时对采摘完成后的黄花菜进行干燥处理,则黄花菜容易发生霉变,影响其品质<sup>[27]</sup>。Liu等<sup>[28]</sup>研究了真空冷冻干燥、太阳干燥和热风干燥对黄花菜品质的影响。结果表明,冷冻干燥是最有效的营养物质干燥方法。Tai等<sup>[29]</sup>研究表明,冷冻干燥比热风干燥更能防止类胡萝卜素的降解,各类胡萝卜素在冻干前后的变化不大。为了提高黄花菜的干燥品质,许国宁等<sup>[30]</sup>优化了真空冷冻干燥工艺条件,结果表明,在物料装载量为225g、加热板温度为50℃下,黄花菜的还原糖含量、Vc含量和复水率最佳。

研究表明,西兰花的玻璃化转化温度和固体熔化温度随着固体含量的降低而降低,冰点随着固体含量的增加而降低<sup>[31]</sup>。Mahn等<sup>[32]</sup>研究发现,与新鲜蔬菜相比,冻干西兰花可以保持较高的多酚含量、半胱氨酸含量和抗辐射能力。刘玉环等<sup>[33]</sup>通过实验研究了西兰花真空冷冻干燥过程的工艺参数和特点,根据西兰

花的冻结温度发现,在真空度60~80Pa下升华干燥9~10h,以及在真空度50~70Pa下解析干燥2h后,所制产品的干燥效果较好。

### 2.2.3 食用菌类

菌菇类食品冻干也是目前干燥果蔬干的重要产品。菌菇主要以鲜食为主,每年约有25%~30%的鲜菇因为销售不畅或品相不好而被废弃。烘干或油炸等传统干制加工手段存在产品营养流失严重、风味口感劣变、油脂含量过高等问题,而冻干技术具有保持风味、高复水性、无添加等方面的优点,因此具有很好的市场前景。其他加工技术(如热风干燥),其干燥过程较缓慢,且营养物质流失严重,所制产品的加工性和复水性较差。

新鲜松茸不易贮藏,容易产生腐败与变质,通过真空冷冻干燥技术能最大程度地保持松茸的营养成分。杨长平等<sup>[34]</sup>通过冻干技术加工新鲜松茸,并测定了冻干松茸的质构和营养指标,分析其动态变化。研究发现,在冻干前后松茸的总酚、蛋白质和脂肪等营养成分含量差别不大,冻干后的松茸具有良好的复水性,可有效抑制美拉德反应,使松茸的黄色度最大化、红色度降低。张艳荣等<sup>[35]</sup>研究了不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分的影响,结果表明,经过冻干处理后姬松茸与鲜姬松茸在整体风味成分上保持一致,说明真空冷冻干燥方式能够较好地保持姬松茸原有的风味。相较于传统的干松茸,冻干技术的优势在于冻干后松茸的蛋白质、维生素、糖等含量更高,同时需要的复水时间更短,吸水率更高<sup>[36]</sup>。

鲜蘑菇的保质期一般为3d,摆放在空气中的时间过长会造成其失水及营养物质的流失,从而降低蘑菇的食用价值。通过真空冷冻干燥技术制成的蘑菇冻干,可有效保存蘑菇中的酯、醇和烷烃,并保护其热敏物质,同时使其具有特殊的风味。刘玉环等<sup>[37]</sup>通过正交试验法优化了双孢蘑菇真空冷冻干燥的最佳工艺参数,确定在预冻温度为-30℃、切片厚度为2mm、以亚硫酸钠溶液(0.45%)为护色剂下的干燥效果最好。卢晓烁等<sup>[38]</sup>研究了香菇在真空冷冻干燥过程中滋味物质的动态变化及鲜味评价,结果表明,香菇的可溶性糖(醇)、游离氨基酸、有机酸等大部分滋味物质在真空冷冻干燥过程中都被很好保留,而在30、40、50℃下解析干燥后冻干蘑菇的等鲜浓度值达到了鲜香菇的2倍。Argyropoulos等<sup>[39]</sup>研究了热风干燥、冷冻干燥和微波真空干燥对蘑菇颜色和质构的影响,结果表明,冻干蘑菇的颜色较好、质地柔软、表观密度较低、复水能力较强,但产生了脆性海绵结构。

### 2.2.4 果蔬类

果蔬类以果实或种子作为蔬菜的主要食用部分,可分为瓠果类、浆果类、荚果类等。瓠果类蔬菜含有丰富的蛋白质、脂肪和糖类,以及多种维生素和矿物

质; 浆果类蔬菜主要含有丰富的维生素 C、类胡萝卜素及有机酸; 荚果类蔬菜则富含蛋白质和糖类等。通过真空冷冻干燥技术, 可较好地保持果蔬类蔬菜的原有成分、活性物质。康三江等<sup>[40]</sup>对比了热风干燥、太阳能干燥和真空冷冻干燥 3 种方式对红辣椒品质和抗氧化活性的影响, 结果表明, 真空冷冻干燥对红辣椒抗氧化活性的影响最低。辣椒自身组织的质构也会对冻干后物质成分造成影响。Materska<sup>[41]</sup>从冻干辣椒和新鲜辣椒中提取酚类物质, 结果表明, 酚类物质的提取率随着组织孔隙率的增加而增加。

### 2.2.5 根茎类

根茎类蔬菜在蔬菜中占有相当重要的位置, 主要以植物茎干或变态茎为可食用部分, 其品种较多, 富含糖类和蛋白质等, 种类、颜色不一。与叶菜类蔬菜相比, 根茎菜的含水量较少、原料表皮较厚, 因此更易贮存。胡萝卜含有多种维生素和矿物质, 常被用来炖煮或炒制, 很少制成食用方便的休闲食品, 冻干胡萝卜的研究有助于提升胡萝卜的经济效益。张艳红<sup>[42]</sup>通过胡萝卜冻干单因素试验, 生产出外形基本不变、口感酥脆、味道十足的胡萝卜冻干产品。夏业鲍等<sup>[43]</sup>研究发现, 胡萝卜切片在预冻板温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预冻 5 h 后, 在真空度 5 Pa 左右进行分时、分段真空, 获得的胡萝卜冻干的色泽饱满、水分含量较低(低于 5%), 同时产品的复水性较佳(5.60), 较好地保持了胡萝卜中的 Vc、胡萝卜素等营养成分。Rajkumar 等<sup>[44]</sup>研究表明, 冷冻干燥可有效保存胡萝卜的香气、颜色和外观, 尽管冷冻干燥的成本较高, 但它被认为是获得高质量胡萝卜产品的最佳方式。

## 2.3 果蔬类食品冻干粉

将果蔬类食品制成冻干粉后, 会提高其稳定性和抗污染性, 延长其保质期。不同种类果蔬粉的添加混合, 补充了当前消费市场广受欢迎的冲泡型饮料、代餐产品中的营养成分, 满足市场对该类产品多样化的需求。

### 2.3.1 果粉

相较于其他方式, 经冻干后制成的果粉具有独特的优势。刘岩龙等<sup>[45]</sup>对比了真空干燥、热风干燥和真空冷冻干燥对制备樱桃果粉的影响, 结果表明, 虽然经真空冷冻干燥处理后获得的樱桃果粉的流动性最差, 但是樱桃果粉的色泽饱满、溶解性最好、水分含量最低, 同时果粉中多酚和花色苷的含量最高, 抗氧化能力和清除自由基能力最好, 因此更适合于高品质樱桃果粉的生产。Verma 等<sup>[46]</sup>使用不同的干燥方法对番石榴进行脱水, 结果表明, 在冷冻干燥下制成果粉的抗坏血酸和酚类物质的保有量最高。叶磊等<sup>[47]</sup>比较了真空冷冻干燥和热风干燥对桑葚果粉品质的影响, 结果表明, 真空冷冻干燥可较好地保持桑葚原有的品质, 果粉中 Vc、总酚、花色苷的保留率均高于热风

干燥。陈红等<sup>[48]</sup>选用新鲜优质的雪莲果, 通过自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥 3 种方法制备了果粉, 对所得果粉的品质进行了感官评价和理化指标测定。结果表明, 经真空冷冻干燥得到的果粉的品质较优, 其颜色为淡黄色, 质感较细腻, 且无异味、香气浓郁、酸甜适宜。彭润玲等<sup>[49]</sup>针对猕猴桃在常规干燥保存过程中不易成粉且化学添加剂过多等问题, 比较了 3 种不同的干燥方式, 结果表明, 相较于热风 and 喷雾干燥, 采用冷冻干燥法制备的猕猴桃粉的综合品质较好、溶解性好、产率较高。

### 2.3.2 蔬菜粉

经冻干后制成的蔬菜粉相较于其他方式占有优势。杨华等<sup>[50]</sup>以西兰花为研究对象, 研究了西兰花蔬菜粉在真空冷冻干燥、喷雾干燥前后产品的主要成分和品质的变化情况, 对比了其蛋白质含量、Vc 含量、色泽、复水比、分散性、溶解度等, 结果表明, 采用真空冷冻干燥方式制得的西兰花粉的品质优于喷雾干燥。

将南瓜加工成粉末, 可便于贮藏和使用。Aydin 等<sup>[51]</sup>将南瓜在温度 $-65\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 130~135 Pa 下冷冻干燥 72 h, 并切片, 制成了南瓜粉。冻干后南瓜粉的颜色饱满, 呈深橙色, 具有高持水能力、更好的油结合能力。Suriya 等<sup>[52]</sup>研究了真空冷冻干燥前后花椰菜花粉的主要成分和品质的变化情况, 结果表明, 真空冷冻干燥能够更好地保留其蛋白质、Vc 和叶绿素等含量, 所得产品具有良好的复水率和分散性。问小龙等<sup>[53]</sup>研究了不同干燥方式对莖叶碎米荠粉的物理性质和营养成分的影响, 相较于热风干燥和自然晒干, 采用真空冷冻干燥后莖叶碎米荠蔬菜粉的色泽浓绿、分散性好、能够快速溶解, 同时其蛋白质和 Vc 等营养成分也得到较好保留。聂希瑞等<sup>[54]</sup>研究了冷冻干燥、真空干燥和鼓风干燥对山药全粉品质的影响, 综合评价了山药全粉的感官评分和营养成分含量, 可知真空冷冻干燥的效果最佳。尽管在 3 种干燥方式下, 山药的营养组分均会部分损失, 但经真空冷冻干燥后其可溶性糖、淀粉、蛋白质 3 类营养物质的损失最小。

### 2.3.3 其他食品

咖啡是世界上最受欢迎的饮料之一, 由于真空冷冻干燥技术能够保留挥发性化合物, 它已被用于生产速溶咖啡粉。胡荣锁等<sup>[55]</sup>研究了加热板温度、物料装载厚度和干燥室压强对冻干咖啡粉的研制及风味品质特性的影响, 得到了理想的参数条件: 加热板温度为 $76.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 物料装载厚度为 1.58 cm, 干燥室压强为 $76.84\text{ Pa}$ 。经冻干后咖啡粉的含水率达到 3.82%, 其色差、气味、口感均无显著性差异, 为冻干咖啡粉工业化生产提供了技术支持。Sagara 等<sup>[56]</sup>研究了冷冻干燥条件对香气的影响。在干燥过程中, 样品的表面

温度分别为 25、45、60、80 °C。咖啡香气的变化程度和趋势会随着干燥温度的升高而改变,因此可以根据咖啡的香气设置不同的温度以满足需要。研究结果还表明,经冻干处理后咖啡豆中所含酚酸的含量比新鲜绿咖啡豆的含量增加了 41%<sup>[57]</sup>。

### 3 工艺优化措施

在真空冷冻干燥前期或干燥期间,优化措施可分为两方面,分别是对产品本身之外的加工技术创新部分和产品本身的预处理方式。

#### 3.1 预处理

化学、机械和热等预处理方式已被广泛运用于冻干果蔬前处理阶段,可有效促进果蔬在干燥过程中的水分运输。化学预处理方式是在干燥前将产品浸泡在酸性或碱性溶液中,溶液通过在果蔬表面形成裂缝,从而促进干燥。由于化学溶液的长时间浸泡容易导致果蔬中含有化学残留物,会降低最终产品的质地风味,同时伴有一定的食品安全风险,因此当前机械预处理方式的接受度更高<sup>[58]</sup>。机械预处理包括果蔬剥皮、磨皮、切分、刺穿表皮等。Defraeye<sup>[59]</sup>研究了鲜切水果的大小和形状对干燥时间和水果质量的影响,将苹果切成不同形状和大小,模拟立方、矩形、圆形和半圆形苹果片的干燥过程,结果表明,矩形样品的干燥时间最短,样品越小则干燥得更快,且质量更好。其他预处理方式包括二氧化硫处理和热预处理,如蒸汽或浸泡在热水中烫漂等,可以让食品中的酶失去活性,避免对产品的风味产生影响。漂白可能会导致食品中蛋白质和矿物质等可溶性营养物质的流失,高温可能导致维生素及其他不稳定营养物质的损失。

目前,关于预冻阶段的研究并不多,快速冷冻会使细胞形成小冰晶,造成食物组织的冷冻断裂和开裂,而慢速冷冻则会在细胞内形成大冰晶,这在一定程度上会破坏食物的组织结构。果蔬等植物类食品组织的水渗透性取决于其微观结构、组成、基质形态,以及在加热或冷冻过程中脂质变化及玻璃化转变<sup>[60]</sup>。预冻处理可用来诱导果蔬类食品组织的微观结构发生变化,从而提高干燥效率及最终产品的干燥质量。马友川等<sup>[61]</sup>采用不同温度(-20 °C冻结、-80 °C冻结、液氮冻结)预冻和 1~3 次冻融处理苹果片的方式,探讨了预冻对苹果片冻干品质的影响。结果表明,相较于快速冻结,采用缓慢冻结处理方式后苹果片的真空冷冻干燥时间明显缩短,同时其脆度显著提高,感官等综合评价较高。最终结果表明,采用-20 °C缓慢冻结联合冻融 1 次处理可显著提高苹果片的干燥效率及综合品质。

#### 3.2 技术创新

目前,真空冷冻干燥工艺面临的技术难点包括运行成本高、能耗高、冻干时间长、冻干流程需要批量

操作等。以前的研究表明,真空冷冻干燥技术的发展都应聚焦于改善机器的传热或避免使用真空,前者有助于缩短升华和干燥时间,后者则有助于降低生产成本<sup>[62]</sup>。近年来,国内外的研究聚焦于开发一些工艺强化技术,以解决部分问题。

自 20 世纪 70 年代以来,学者们一直在进行微波加热与冷冻干燥联合的研究<sup>[62]</sup>,而近年来利用微波加强冷冻干燥技术也重新得到人们的关注。微波作为一种输入型能量,主要在冻结区域被吸收。冻结区域具有较高的导热性,微波能量有助于干燥过程中水分的升华,从而缩短约 60%~75%的冻干时间<sup>[63]</sup>。此外,与传统的冷冻干燥相比,微波辅助冷冻干燥更节能,有助于生产出质量更高的干燥产品<sup>[64]</sup>。尽管微波冷冻干燥具有上述优点,但因微波过程中电晕放电及不均匀加热,冻结的冰晶易融化,且热量过高,因而难以控制最终产品的质量和均一性,限制了该项技术的商业化量产<sup>[65]</sup>。Duan 等<sup>[64]</sup>研究发现,微波冷冻联合干燥技术未来的发展方向为扩大操作规模、提供准确的温度监测、适当模拟微波场分布及增加对食品介电特性的学习认识。由此可见,目前国内外发表的大量论文大多探讨了微波技术对最终产品质量和均一性的影响,如土豆、香蕉、蘑菇、秋葵、苹果等。Fan 等<sup>[66]</sup>总结指出,当前果蔬类食品的微波冷冻干燥联合技术需要运用新的非热技术,如超声波、高压处理或脉冲电场等,以提高含有热敏性物质的果蔬类食品的冻干质量。

不仅是微波联合干燥,通过将多种干燥技术联合的方式可以达到优势互补,通过分阶段对物料进行干燥脱水,可以提高干燥产品的最终质量,有效减少能耗和成本。目前,已形成了包括热风冷冻联合干燥、真空冷冻-压差闪蒸组合干燥、热泵冷冻联合干燥等多种联合干燥技术。罗小梅等<sup>[67]</sup>研究表明,热风冷冻联合干燥与单独冷冻干燥相比,其干燥效率更高,且制成的金花茶花朵在室内常温下的贮藏时间更长,更不易变质,同时能更好地保留花朵中茶多酚的活性。压差闪蒸联合干燥技术作为一种新型节能环保的优质干燥技术,近些年发展迅速。该种干燥方式通过将常用食品干燥方法(如热风、热泵、真空冷冻干燥等)与压差闪蒸技术串联起来,用以生产疏松多孔的冻干类食品<sup>[68]</sup>,与单一冷冻干燥相比,该方式的能耗更低。热泵干燥具有参数易于控制、温度低、能耗低等优点,适用于果蔬类等热敏性食品原料的干燥。尽管后期的干燥效率较低,但与真空冷冻干燥技术联合,可有效解决该问题,并有助于提高其干燥速率,改善最终干燥产品的质量<sup>[69]</sup>。

目前,随着真空冷冻干燥技术的不断发展,冷冻干燥在线监控、品质智能检测等新技术不断涌现。由于受到测量仪器尺寸、使用条件、冻干箱保冷、真空度等因素的限制,在传统的冷冻干燥过程中,对含水量的测定只能通过经验及反复试验,因此亟须解决物

料含水量的即时监测问题<sup>[70]</sup>。新型的在线监控技术通过对物料含水率、温度和质量变化情况的观察,判断干燥进程,具有精度高、与实际测量值的误差较小等特点,这为今后真空冷冻干燥工艺的自动化进展提供了条件。Wang等<sup>[71]</sup>将智能检测技术运用于浆果加工,在加工过程中各种参数的智能、快速检测化满足了人们对果蔬类产品高质量、自动化、高通量检测的需求,同时也是未来食品工业的发展方向。不过目前该项技术尚未进入食品加工领域,相信随着技术的不断革新,未来终会应用于商业化生产中。

## 4 结语

目前,真空冷冻干燥技术已经广泛用于果蔬类食品的脱水干燥,包括水果、蔬菜、植物香辛料等。尽管真空冷冻干燥技术存在干燥时间长、用价昂贵等缺点,但仍是高质量产品脱水的首选方式。虽然在冷冻干燥过程中仍会损失部分维生素和其他生物活性物质,但与其他干燥方式相比,真空冷冻干燥技术仍是保持食品原有营养成分的最佳方式。采用真空冷冻干燥技术提取食品营养成分、功能活性物质,也是当下提升食品附加值的趋势。近年来,通过预处理或一些创新技术的工艺强化有效解决了真空冷冻干燥技术面临的问题,随着在线监控、品质智能监测等技术的引入,真空冷冻干燥得到了进一步发展。相信随着技术水平的不断进步和市场需求的不增长,未来冻干技术在食品生产中将具有更广阔的发展空间。

### 参考文献:

- [1] World Health Organization. Fruit and Vegetables for Health: Report of a Joint FAO[EB/OL]. (2004-09-03) [2022-07-20].[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43143/9241592818\\_eng.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43143/9241592818_eng.pdf).
- [2] 吴满刚, 王俊山, 段立昆, 等. 不同干燥处理方法对鸡肉丁的干燥效果[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 235-241.  
WU Man-gang, WANG Jun-shan, DUAN Li-kun, et al. Effects of Different Drying Methods on Drying Chicken Cubes[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 235-241.
- [3] MERIVAARA A, ZINI J, KOIVUNOTKO E, et al. Preservation of Biomaterials and Cells by Freeze-Drying: Change of Paradigm[J]. Journal of Controlled Release, 2021, 336: 480-498.
- [4] BHATTA S, STEVANOVIC JANEZIC T, RATTI C. Freeze-Drying of Plant-Based Foods[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2020, 9(1): 87.
- [5] SUNDARAMURTHI P, SURYANARAYANAN R. Calorimetry and Complementary Techniques to Characterize Frozen and Freeze-Dried Systems[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2012, 64(5): 384-395.
- [6] ASSEGEHEGN G, BRITO-DE LA FUENTE E, FRANCO J M, et al. The Importance of Understanding the Freezing Step and Its Impact on Freeze-Drying Process Performance[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019, 108(4): 1378-1395.
- [7] PATEL S M, DOEN T, PIKAL M J. Determination of End Point of Primary Drying in Freeze-Drying Process Control[J]. AAPS PharmSciTech, 2010, 11(1): 73-84.
- [8] TANG Xiao-lin Tang. PIKAL M J. Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice[J]. Pharmaceutical Research, 2004, 21(2): 191-200.
- [9] 许晴晴, 陈杭君, 郜海燕, 等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.  
XU Qing-qing, CHEN Hang-jun, GAO Hai-yan, et al. Effects of Vacuum Freeze-Drying and Hot-Air Drying on the Quality of Blueberry Fruits[J]. Food Science, 2014, 35(5): 64-68.
- [10] 郭建业, 张艳红, 张岚, 等. 草莓片真空冷冻干燥工艺研究[J]. 农产品加工, 2021(7): 27-30.  
GUO Jian-ye, ZHANG Yan-hong, ZHANG Lan, et al. Study on the Vacuum Freeze-Drying Processing Technology of Strawberry Slices[J]. Farm Products Processing, 2021(7): 27-30.
- [11] PROSAPIO V, NORTON I, DE MARCO I. Optimization of Freeze-Drying Using a Life Cycle Assessment Approach: Strawberries' Case Study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 1171-1179.
- [12] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 100-106.  
LI Bao-yu. Effects of Different Drying Methods on Quality of Banana Products[J]. Food Science, 2016, 37(15): 100-106.
- [13] ANDINO A R, PIENIAZEK F, MESSINA V. Texture of Bananas Submitted to Different Freeze Drying Cycle Applying Scanning Electron Microscopy with Image Analysis Techniques[J]. Food Biophysics, 2019, 14(1): 13-21.
- [14] 郭玉霞, 毕金峰, 易建勇, 等. 添加果皮对真空冷冻干燥重组芒果和火龙果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 178-189.  
GUO Yu-xia, BI Jin-feng, YI Jian-yong, et al. Effect of Adding Peel on Quality of Freeze-Dried Restructured Mango and Pitaya Chips[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 178-189.

- [15] 高静静, 冯作山, 白羽嘉. 真空冷冻和热风干燥对哈密瓜片品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 78-84.  
GAO Jing-jing, FENG Zuo-shan, BAI Yu-jia. Effects of Vacuum Freeze Drying and Hot Air Drying on the Quality of Cantaloupe Slices[J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 78-84.
- [16] 杨慧, 吴洪斌, 贾文婷, 等. 基于品质分析的哈密瓜真空冷冻-变温压差膨化联合干燥工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(5): 56-62.  
YANG Hui, WU Hong-bin, JIA Wen-ting, et al. Study on Vacuum Freeze Drying Combined with Modified Temperature and Pressure Explosion Puffing Drying Technology of Hami-Melon Based on Quality Analysis[J]. Storage and Process, 2022, 22(5): 56-62.
- [17] 宋娟, 康三江, 张海燕, 等. 干燥处理对黄冠梨生化成分和风味物质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2022(1): 60-66.  
SONG Juan, KANG San-jiang, ZHANG Hai-yan, et al. Effects of Drying Treatments on Biochemical Components and Flavor Compounds of Huangguan Pear[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2022(1): 60-66.
- [18] DALMAU M E, BORNHORST G M, EIM V, et al. Effects of Freezing, Freeze Drying and Convective Drying on *in Vitro* Gastric Digestion of Apples[J]. Food Chemistry, 2017, 215: 7-16.
- [19] SCHULZE B, HUBBERMANN E M, SCHWARZ K. Stability of Quercetin Derivatives in Vacuum Impregnated Apple Slices after Drying (Microwave Vacuum Drying, Air Drying, Freeze Drying) and Storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 426-433.
- [20] 马有川. 预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 15-21.  
MA You-chuan. Study on Effects of Pretreatments on the Drying Characteristics and Quality of Freeze-Dried Apple Chips[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 15-21.
- [21] 袁小峰, 阮征, 张飞, 等. 正交试验优化蜜柚真空冷冻干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 100-105.  
YUAN Xiao-feng, RUAN Zheng, ZHANG Fei, et al. Optimization of Vacuum Freeze-Drying Process of Honey Pomelo by Orthogonal Test[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 100-105.
- [22] 黄忠闯, 李全阳, 姚春杰, 等. 热风干燥和真空冷冻干燥芒果品质的比较研究[J]. 农业机械, 2011(26): 101-105.  
HUANG Zhong-chuang, LI Quan-yang, YAO Chun-jie, et al. Comparative Study on the Quality of Mango by Hot Air Drying and Vacuum Freeze Drying[J]. Farm Machinery, 2011(26): 101-105.
- [23] SALAZAR N A, ALVAREZ C, ORREGO C E. Optimization of Freezing Parameters for Freeze-Drying Mango (*Mangifera Indica* L.) Slices[J]. Drying Technology, 2018, 36(2): 192-204.
- [24] 桂青, 王秀全, 黄坚雄, 等. 不同干燥方式对五指毛桃品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 58-65.  
GUI Qing, WANG Xiu-quan, HUANG Jian-xiong, et al. Study on Quality Differences of *Ficus Hirta* Vahl. Dried by Vary Processes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 58-65.
- [25] 李宝磊, 张丽, 陈苏, 等. 真空冷冻干燥技术在食品和中草药行业的应用[J]. 饮料工业, 2019, 22(6): 71-74.  
LI Bao-lei, ZHANG Li, CHEN Su, et al. Application of Freeze-Drying Technology in Food and Chinese Herbal Medicine Industry[J]. Beverage Industry, 2019, 22(6): 71-74.
- [26] 刘媛媛, 张亚林, 姚丹丹, 等. 真空冷冻干燥柳蒿芽加工技术及品质分析[J]. 食品安全导刊, 2022(22): 126-128.  
LIU Yuan-yuan, ZHANG Ya-lin, YAO Dan-dan, et al. Processing Technology and Quality Analysis of Vacuum Freeze-Dried Artichoke Buds[J]. China Food Safety Magazine, 2022(22): 126-128.
- [27] 王莹莹, 武晔秋, 刘玥. 不同干燥工艺对黄花菜的干燥效果影响分析[J]. 保鲜与加工, 2022(6): 22.  
WANG Ying-ying, WU Ye-qiu, LIU Yue. Analysis on the Influence of Different Drying Processes on the Drying Effect of Cauliflower[J]. Preservation and Processing, 2022(6): 22.
- [28] LIU Wei, ZHAO Yang, SUN Jiang-hao, et al. Study the Effects of Drying Processes on Chemical Compositions in Daylily Flowers Using Flow Injection Mass Spectrometric Fingerprinting Method and Chemometrics[J]. Food Research International, 2017, 102: 493-503.
- [29] TAI C Y, CHEN B H. Analysis and Stability of Carotenoids in the Flowers of Daylily (*Hemerocallis Disticha*) as Affected by Various Treatments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(12): 5962-5968.
- [30] 许国宁, 吴素玲, 孙晓明, 等. 黄花菜真空冷冻干燥工艺优化研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 290-293.  
XU Guo-ning, WU Su-ling, SUN Xiao-ming, et al. Optimization of the Parameters of the Daylily Vacuum Freeze-Drying Processing[J]. Science and Technology

- of Food Industry, 2013, 34(2): 290-293.
- [31] SURESH S, AL-HABSI N, GUIZANI N, et al. Thermal Characteristics and State Diagram of Freeze-Dried Broccoli: Freezing Curve, Maximal-Freeze-Concentration Condition, Glass Line and Solids-Melting[J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 655: 129-136.
- [32] MAHN A, ZAMORANO M, BARRIENTOS H, et al. Optimization of a Process to Obtain Selenium-Enriched Freeze-Dried Broccoli with High Antioxidant Properties[J]. *LWT*, 2012, 47(2): 267-273.
- [33] 刘玉环, 杨德江, 冯九海, 等. 西兰花真空冷冻干燥的加工工艺及机理[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(10): 110-112.  
LIU Yu-huan, YANG De-jiang, FENG Jiu-hai, et al. The Research on Dry Frozen Broccoli Process and Its Mechanism[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, 34(10): 110-112.
- [34] 杨长平, 顾思远, 黄文刚, 等. 松茸的真空冷冻干燥特性研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(5): 43-46.  
YANG Chang-ping, GU Si-yuan, HUANG Wen-gang, et al. Study on Vacuum Freeze-Drying Characteristics of Tricholoma Matsutake[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 43-46.
- [35] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 116-121.  
ZHANG Yan-rong, LYU Cheng-yu, LIU Tong, et al. Effect of Different Drying Methods on Volatile Flavor Components in Agaricus Blazei[J]. *Food Science*, 2016, 37(10): 116-121.
- [36] 韩珍珠, 曹新志. 冻干松茸的生产工艺[J]. *绵阳经济技术高等专科学校学报*, 2000, 17(1): 28-29.  
HAN Zhen-qiong, CAO Xin-zhi. Technological Process of Vacuum Freezing and Drying Tricholoma Matsutake[J]. *Journal of Mianyang College of Economy & Technology*, 2000, 17(1): 28-29.
- [37] 刘玉环, 焦扬, 何利明. 双孢蘑菇切片真空冷冻干燥工艺[J]. *中国蔬菜*, 2014(10): 34-36.  
LIU Yu-huan, JIAO Yang, HE Li-ming. Studies on Optimization of Vacuum Freeze Drying Technology for Agaricus Bisporus Slices[J]. *China Vegetables*, 2014(10): 34-36.
- [38] 卢晓烁, 张毅航, 方东路, 等. 香菇真空冷冻干燥过程中滋味物质动态变化及鲜味评价[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 91-97.  
LU Xiao-shuo, ZHANG Yi-hang, FANG Dong-lu, et al. Dynamic Change of Taste Compounds and Umami Evaluation of Lentinula Edodes during Vacuum Freeze-Drying Process[J]. *Food Science*, 2021, 42(20): 91-97.
- [39] ARGYROPOULOS D, HEINDL A, MÜLLER J. Assessment of Convection, Hot-Air Combined with Microwave-Vacuum and Freeze-Drying Methods for Mushrooms with Regard to Product Quality[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(2): 333-342.
- [40] 康三江, 宋娟, 张海燕, 等. 3种干燥方式对红辣椒品质和抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 43-52.  
KANG San-jiang, SONG Juan, ZHANG Hai-yan, et al. Effects of Three Drying Methods on the Quality and Antioxidant Activity of Red Pepper[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(16): 43-52.
- [41] MATERSKA M. Bioactive Phenolics of Fresh and Freeze-Dried Sweet and Semi-Spicy Pepper Fruits (*Capsicum Annuum* L)[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 7: 269-277.
- [42] 张艳红. 胡萝卜真空冷冻干燥试验[J]. *农业工程*, 2019, 9(11): 52-55.  
ZHANG Yan-hong. Vacuum Freeze-Drying Test for Carrot[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(11): 52-55.
- [43] 夏业鲍, 曾海彬, 陆宁. 胡萝卜真空冷冻干燥工艺的研究[J]. *包装与食品机械*, 2009, 27(4): 30-32.  
XIA Ye-bao, ZENG Hai-bin, LU Ning. Study on Vacuum Freeze-Drying Technology of Carrot[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2009, 27(4): 30-32.
- [44] RAJKUMAR G, SHANMUGAM S, DE SOUSA GALVÃO M, et al. Comparative Evaluation of Physical Properties and Aroma Profile of Carrot Slices Subjected to Hot Air and Freeze Drying[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(6): 699-708.
- [45] 刘岩龙, 张彩丽, 李婷婷, 等. 不同干燥方式对櫻桃果粉品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 26-30.  
LIU Yan-long, ZHANG Cai-li, LI Ting-ting, et al. Effect of Different Drying Methods on the Quality of Cherry Powder[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(7): 26-30.
- [46] VERMA M, SINGH J, KAUR D, et al. Effect of Various Dehydration Methods and Storage on Physicochemical Properties of Guava Powder[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(1): 528-534.
- [47] 叶磊, 郜海燕, 周拥军, 等. 热风干燥与真空冷冻干燥对桑葚果粉品质的影响比较[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(2): 155-159.  
YE Lei, GAO Hai-yan, ZHOU Yong-jun, et al. Quality Comparison of Mulberry Powder by Hot Air Drying and

- Vacuum Freeze Drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(2): 155-159.
- [48] 陈红, 樊建林, 吕海丹, 等. 雪莲果果粉的制备工艺研究[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 25-28.  
CHEN Hong, FAN Jian-lin, LYU Hai-dan, et al. Study on Preparation Technology of Yacon Powder[J]. Journal of Northwest University for Nationalities (Natural Science), 2016, 37(4): 25-28.
- [49] 彭润玲, 王威, 韦妍, 等. 真空冷冻干燥猕猴桃粉工艺的研究[J/OL]. 真空, 2022: 1-8. (2022-09-19). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1174.TB.20220919.0920.002.html>.  
PENG Run-ling, WANG Wei, WEI Yan, et al. Study on the Process of Vacuum Freeze-Drying Kiwifruit Powder[J/OL]. Vacuum, 2022: 1-8. (2022-09-19). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1174.TB.20220919.0920.002.html>.
- [50] 杨华, 杨性民, 孙金才. 不同干燥方式对西兰花蔬菜粉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(7): 152-158.  
YANG Hua, YANG Xing-min, SUN Jin-cai. Effect of Different Drying Methods on Vegetable Powder Quality of the Broccoli (*Brassica Oleracea*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(7): 152-158.
- [51] AYDIN E, GOCMEN D. The Influences of Drying Method and Metabisulfite Pre-Treatment On the Color, Functional Properties and Phenolic Acids Contents and Bioaccessibility of Pumpkin Flour[J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(1): 385-392.
- [52] SURIYA M, BARANWAL G, BASHIR M, et al. Influence of Blanching and Drying Methods on Molecular Structure and Functional Properties of Elephant Foot Yam (*Amorphophallus Paeoniifolius*) Flour[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 68: 235-243.
- [53] 问小龙, 龙澜, 殷红清, 等. 不同干燥方式对莖叶碎米苣蔬菜粉品质的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 56-61.  
WEN Xiao-long, LONG Lan, YIN Hong-qing, et al. Effects of Different Drying Methods on the Quality of Cardamine Violifolia Powder[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 56-61.
- [54] 聂希瑞, 郭元照, 秦文. 不同干燥方式对山药全粉品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(4): 27-31.  
NIE Xi-rui, GUO Yuan-zhao, QIN Wen. The Influence of Different Drying Method on Yam-Flour Quality[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2017, 53(4): 27-31.
- [55] 胡荣锁, 段其站, 董文江, 等. 冻干咖啡粉的研制及风味品质特性研究[J]. 热带作物学报, 2019, 40(8): 1618-1625.  
HU Rong-suo, DUAN Qi-zhan, DONG Wen-jiang, et al. Preparation and Flavor Quality Characteristics of Freeze-Dried Coffee Powder[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(8): 1618-1625.
- [56] SAGARA Y, KAMINISHI K, GOTO E, et al. Characteristic Evaluation for Volatile Components of Soluble Coffee Depending on Freeze-Drying Conditions[J]. Drying Technology, 2005, 23(9/10/11): 2185-2196.
- [57] CHENG Ke, DONG Wen-jiang, LONG Yu-zhou, et al. Evaluation of the Impact of Different Drying Methods on the Phenolic Compounds, Antioxidant Activity, and in Vitro Digestion of Green Coffee Beans[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1084-1095.
- [58] GRABOWSKI S, MARCOTTE M, QUAN D, et al. Kinetics and Quality Aspects of Canadian Blueberries and Cranberries Dried by Osmo-Convective Method[J]. Drying Technology, 2007, 25(2): 367-374.
- [59] DEFRAEYE T. Impact of Size and Shape of Fresh-Cut Fruit on the Drying Time and Fruit Quality[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 35-41.
- [60] GOSWAMI T K, SINGH M. Role of Feed Rate and Temperature in Attrition Grinding of Cumin[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2/3): 285-290.
- [61] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241-250.  
MA You-chuan, BI Jin-feng, YI Jian-yong, et al. Effects of Pre-Freezing on the Drying Characteristics and Quality Parameters of Freeze Drying Apple Slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 241-250.
- [62] RATTI C. Hot Air and Freeze-Drying of High-Value Foods: A Review[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 311-319.
- [63] PETTRE R P, ARSEM H B, MA Y H. Applications of Microwave Heating to Freeze Drying: Perspective[J]. AIChE Symposium Series, 1977, 73(163): 131-133.
- [64] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods[J]. Drying Technology, 2010, 28(4): 444-453.
- [65] WANG Yuan-feng, LIU Yang-yang, HUO Jiang-lei, et al. Effect of Different Drying Methods on Chemical Composition and Bioactivity of Tea Polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules,

- 2013, 62: 714-719.
- [66] FAN Kai, ZHANG Min, MUJUMDAR A S. Recent Developments in High Efficient Freeze-Drying of Fruits and Vegetables Assisted by Microwave: A Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(8): 1357-1366.
- [67] 罗小梅, 林国轩, 覃榆茏, 等. 冷冻真空-热风联合干燥技术对金花茶花朵品质的影响[J]. *中国热带农业*, 2021(3): 67-72.
- LUO Xiao-mei, LIN Guo-xuan, QIN Yu-long, et al. Effects of Freeze Vacuum Combining with Hot Blast Drying Technology on the Quality of *Camellia Nitidissima* Flowers[J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(3): 67-72.
- [68] 毕金峰, 胡丽娜, 吕健, 等. 压差闪蒸联合干燥技术与动态优化策略研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(1): 1-10.
- BI Jin-feng, HU Li-na, LYU Jian, et al. Research Advance of Instant Controlled Pressure Drop Combined Drying Technology and Dynamic Optimization Strategy[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(1): 1-10.
- [69] 刘静, 吴小恬, 赵亚, 等. 果蔬热泵联合干燥技术的研究进展[J]. *中国果菜*, 2022, 42(1): 8-15.
- LIU Jing, WU Xiao-tian, ZHAO Ya, et al. Research Progress of Fruits and Vegetables by Heat Pump Combined Drying Technology[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2022, 42(1): 8-15.
- [70] 赵海波, 彭鑫, 吴坤, 等. 真空冷冻干燥在线测试系统设计及测试[J]. *食品与机械*, 2020, 36(1): 116-120.
- ZHAO Hai-bo, PENG Xin, WU Kun, et al. Design and Test of an On-Line Measuring System for Vacuum Freezing Dryer[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(1): 116-120.
- [71] WANG Da-yuan, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Advanced Detection Techniques Using Artificial Intelligence in Processing of Berries[J]. *Food Engineering Reviews*, 2022, 14(1): 176-199.

责任编辑: 彭颀