

# 真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用研究 进展与展望

罗珊珊<sup>1</sup>, 孙 兰<sup>1</sup>, 殷显婷<sup>1</sup>, 汪 茜<sup>1</sup>, 龚巧媛<sup>2</sup>, 王正杰<sup>2</sup>, 杨瑶君<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>乐山师范学院竹类病虫害防控与资源开发四川省重点实验室, 四川 乐山

<sup>2</sup>四川省大渡河造林局有限公司, 四川 乐山

<sup>3</sup>乐山师范学院林竹科技创新产业研究院, 四川 乐山

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月15日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘 要

真空冷冻干燥(Vacuum Freeze Drying, VFD)是以低温真空下冰晶直接升华为水蒸气的原理为基础实现物料脱水的先进加工技术, 因而能极好地保留食品的营养成分、色泽、风味及组织结构, 故被公认为食品干燥领域的“黄金标准”。VFD技术经过充分的科学研究和工程实践, 已经发展成为食品、医药、生物科技诸领域中十分成熟、重要的核心加工手段。因此本文对VFD技术的原理及特点做了清晰、严谨的先期介绍, 讨论其在果蔬、肉制品及水产品、乳制品、调味品、功能性食品加工中的典型应用, 再从预处理节能技术、联合干燥工艺、智能化控制等角度系统梳理近年主要技术创新进展, 客观分析当前高能耗、高成本、智能化水平有限诸种问题, 提出其在连续化生产、精准营养、绿色低碳等领域的发展趋势。

## 关键词

真空冷冻干燥, 食品加工, 联合干燥, 智能化控制, 节能降耗

# Research Progress and Prospect of Vacuum Freeze-Drying Technology in Food Processing

Shanshan Luo<sup>1</sup>, Lan Sun<sup>1</sup>, Xianting Yin<sup>1</sup>, Xi Wang<sup>1</sup>, Qiaoyuan Gong<sup>2</sup>, Zhengjie Wang<sup>2</sup>, Yaojun Yang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Sichuan Provincial Key Laboratory of Bamboo Diseases and Pests Control and Resource Development, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

<sup>2</sup>Sichuan Dadu River Afforestation Bureau Co., Ltd., Leshan Sichuan

<sup>3</sup>Institute of Forestry & Bamboo Science and Technology Innovation Industry, Leshan Normal University, Leshan Sichuan

文章引用: 罗珊珊, 孙兰, 殷显婷, 汪茜, 龚巧媛, 王正杰, 杨瑶君. 真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用研究进展与展望[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(3): 290-297. DOI: 10.12677/hjfn.2026.153033

## Abstract

Vacuum Freeze Drying (VFD) is an advanced dehydration technique predicated upon the direct sublimation of ice crystals into water vapor under low-temperature vacuum conditions. Owing to its exceptional capacity to preserve the nutritional constituents, color, flavor, and textural integrity of food materials, VFD is widely acknowledged as the “gold standard” in the domain of food drying. Through rigorous scientific investigation and engineering refinement, VFD has evolved into a mature and indispensable core operation across the food, pharmaceutical, and biotechnology industries. Accordingly, this paper first provides a clear and methodical exposition of the fundamental principles and defining characteristics of VFD. It then proceeds to a substantive discussion of its representative applications in the processing of fruits and vegetables, meat and aquatic products, dairy items, seasonings, and functional foods. Subsequently, major technological advances in recent years are systematically reviewed from the perspectives of energy-efficient pretreatment strategies, hybrid drying methodologies, and intelligent process control. The prevailing challenges—including substantial energy consumption, elevated operational expenditure, and limited degrees of automation—are subjected to objective scrutiny. Finally, the paper delineates prospective developmental trajectories with respect to continuous production systems, precision nutrition paradigms, and green low-carbon initiatives.

## Keywords

Vacuum Freeze-Drying, Food Processing, Combined Drying, Intelligent Control, Energy Saving and Consumption Reduction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

新鲜食品因水分含量高、微生物易繁殖、酶促反应活跃，在常温条件下极易腐败变质，货架期普遍较短[1]。干燥是延长食品保质期的核心加工工艺，目前食品工业中应用的干燥方法主要分为传统干燥与现代干燥两类。传统干燥以热风、微波、喷雾干燥为主，具有成本低、易规模化的优势，但高温处理过程易造成热敏性营养损失、风味物质挥发，同时会导致物料质构硬化、复水性变差[2]。现代干燥技术更注重产品品质保留，其中真空冷冻干燥(VFD)在低温真空条件下实现冰晶直接升华，能够最大程度保持食品原有形态、风味与营养，已成为高端食品加工的关键技术[3]。

近年来，由于消费升级、健康饮食普及以及预制菜、休闲食品等新兴市场快速发展，我国冻干食品增速已超过全球 7.8% 的水平[3]。然而，VFD 仍面临干燥周期长、能耗高、设备投资大等瓶颈。本文系统梳理 VFD 技术的原理、应用现状、技术创新及未来趋势，以期对相关研究与应用提供参考。

## 2. 真空冷冻干燥技术原理与特点

### 2.1. 基本原理

真空冷冻干燥技术基于水的三相变化原理。当环境压力低于 610.5 Pa (水的三相点压力)时，水的沸点

与冰点重合,冰可以直接从固态升华为气态[4]。整个干燥过程通常分为三个连续阶段。预冻:物料快速冷却至共晶点以下(-30℃至-50℃),形成细小均匀冰晶。快速冷冻减少细胞损伤,慢速冷冻产生更疏松的孔隙[5]。一次干燥(升华干燥):抽真空(<60 Pa),冰晶升华并被冷凝器捕获,耗时约占70%以上[6]。二次干燥(解析干燥):升温至30℃~50℃,去除结合水,最终水分<5% [7]。

## 2.2. 核心优势

真空冷冻干燥技术有若干突出优点,因此它很自然地成为高品质干燥工艺最典型的代表。

营养与活性成分高保留:低温环境使维生素、多酚、花青素等热敏性物质的降解率大大低于热风干燥,而冻干技术对维生素、多酚、酶等活性物质的保留率可达95%~98% [8]。董焯等对此做了系统考察,证实液氮冻结-真空冷冻干燥处理的膨腹海马总蛋白质含量比热风干燥高12.90%,不饱和脂肪酸含量高49.93% [9]。

色泽与形态几乎不变:干燥时物料始终处在冻结状态,故干燥过程不存在水分蒸发所引起的收缩、皱缩、塌陷诸种问题[9]。

风味物质保留充分:低温真空环境能很好地抑制美拉德反应、脂质氧化等风味劣变反应,张雅欣等人讨论了用复配技术调控蓝靛果冻干风味品质,结果表明树莓复配组各香气属性得分最高[10]。

优良的复水性与便捷性:冻干产品有疏松多孔的结构,其复水性能极好,一般3~5分钟就能恢复原有形态,产品重量减轻70%~90%,体积大大缩小,极有利于储存、运输[11]。

## 3. 真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用

真空冷冻干燥技术适用范围极为广泛,涵盖果蔬、肉禽水产、乳制品、调味品及功能性食品等多种物料。

### 3.1. 果蔬制品

冻干果蔬是VFD技术在食品加工中应用最成熟的领域之一,草莓、苹果、芒果等水果经冻干后制成酥脆口感的休闲零食,色泽、形状和复水性均得到良好保持。王鹏飞等指出,VFD技术可用于桑果、黄秋葵等各类农副产品,冻干处理后营养成分保存更完整,体积和重量大幅降低,便于运输和长期保存[1]。张桂芝等以火龙果为原料,发现VFD技术对果肉、果皮、花及茎加工后,颜色、味道及营养物质有效保存,制成冻干粒或粉末后更便于产品开发。火龙果冻干粉末极易溶于水,颜色鲜艳不易褪色,为饮料制作或天然色素应用提供了新途径[12]。在高端功能性果蔬制品开发方面,张雅欣等将蓝靛果与蓝莓、树莓和黑加仑进行1:1复配制备复合冻干制品,发现复配稀释了山梨糖醇和葡萄糖含量,但丰富了有机酸种类;香气方面强化了清凉香气、苦杏仁味、焙烤香及油脂香气,感官评价显示树莓复配组得分最高[10]。吴雨豪等系统综述指出,VFD技术能最大程度保留果蔬的色泽、质构、形状以及维生素、矿物质、蛋白质和酚类等营养成分,已在浆果类、瓜果类、仁果类、柑橘类、核果类水果以及叶菜类、花菜类、食用菌类、根茎类蔬菜中得到广泛应用[13]。

### 3.2. 肉制品与水产品

肉制品和水产品因含水率高、内源酶丰富,极易腐败变质,干燥是其重要的高值化加工途径。VFD技术能够有效保留蛋白质等营养成分,复水后口感鲜嫩,保质期可延长至2~3年。董焯等系统比较了热风干燥、真空干燥及三种不同冻结温度(-20℃、-80℃、液氮)的真空冷冻干燥对膨腹海马的影响。结果显示,真空冷冻干燥可有效抑制干制过程中的变色和收缩,三种冻干处理的收缩率均在2.0%以下。其中液氮冻结-真空冷冻干燥(L-LN)在微观结构、蛋白质二级结构、水分迁移及风味品质方面优势突出:扫描

电镜显示其孔隙最规则、数量最多；总蛋白质含量比热风干燥高 12.90%，不饱和脂肪酸含量高 49.93% [9]。在宠物食品领域，李乐毅等研究了辐照技术对冻干鸡肉丁品质的影响，发现电子束辐照可有效减缓脂肪氧化，在杀菌和保持风味品质方面优于 Co $\gamma$  射线。经 2~4 kGy 剂量辐照能有效杀灭微生物，且电子束的覆盖范围优于 Co $\gamma$  射线[14]。

### 3.3. 乳制品

冻干工艺能很好地保留酸奶中活性菌群及各种营养成分，有利于携带和储存，因此以酸奶为原料经真空冷冻干燥脱水制成的冻干酸奶块，能最大限度地提高益生菌存活率，同时保留原有风味、营养，口感清脆，便于携带，储存期极长。经科学检测确认，其冻干酸奶块中活菌数可达  $1 \times 10^8$  CFU/g 以上 [15]。

### 3.4. 调味品

冻干技术在高品质速溶咖啡、茶粉及复合调味料生产中有十分突出的应用价值：能很好地保留香气，又可避免褐变。冻干香葱中含硫风味物质比热风干燥提高了 12 倍，冻干生姜粉在得率、姜辣素含量、感官性能诸方面都优于热风干燥产品，而超声波喷雾 - 冷冻干燥制备的海鲜调味料粉体细腻，溶解性极好，挥发性化合物保留充分，能极真实地还原整体风味，且解决了热不稳定组分保存的难题[16]。

### 3.5. 功能性食品

真空冷冻干燥已在功能性食品加工中应用十分成熟，在益生菌加工中表现出极好优势：冻干技术能使益生菌存活率极大提高，常温储存稳定性明显改善，而采用多层冻干封装技术(海藻糖保护层、脂质微囊、pH 响应型肠溶包衣)的益生菌制剂能有效保护菌株免受胃酸破坏[15]。张雪丽等以核桃仁为基料，添加黑芝麻、石榴粉、葛根淀粉、枸杞及白砂糖，用 VFD 技术开发出一款新型石榴风味核桃冻干食品，通过正交试验系统地优化配方，所得产品香气浓郁、酥脆适口、甜度宜人，因此成为核桃类休闲食品的范例[17]。冻干技术也适用于火龙果茎中粗多糖的提取，新鲜火龙果茎经清洗、切块、热水浸提、离心、浓缩、醇沉、洗涤后，真空冷冻干燥即得粗多糖产品[12]。

## 4. 研究进展：技术创新与发展动态

近年来，围绕 VFD 技术的降本增效和品质提升，学术界与产业界开展了大量创新研究。为直观比较不同改进技术的效果，本文汇总了代表性研究的关键量化数据，如表 1 所示。

**Table 1.** Comparison of key technological improvement effects of VFD

**表 1.** VFD 关键技术改进效果对比

技术方向	应用物料	关键工艺参数	核心效果
微波联合冻干	南瓜	微波 - 电能联合冻干	干燥时间缩短约 53%；能耗降低 48.8%；Vc 保留率 > 95%
超声波预处理	蓝莓	超声波 + 真空冷冻干燥	Vc 保留率 86%；干燥效率提升约 40%
复配调控	蓝靛果	与树莓 1:1 复配	感官评分显著提高，风味物质保留
联合干燥	猕猴桃	真空冷冻干燥	收缩率 13.24%，复水率 306.07%

### 4.1. 预处理节能技术

在冻干前对物料进行适当预处理，可在不显著影响产品品质的前提下大幅提升干燥效率、缩短干燥周期。目前研究较深入的预处理技术包括超声波处理、冻融循环、微波处理及高压脉冲电场处理等。

由于超声波预处理能利用空化效应破坏细胞壁、形成微孔通道,故能有效解决复合果蔬热传导不均引起的干燥效率低的问题[18]。冻融循环预处理通过反复冻结-解冻机械破坏细胞壁,能优化物料的孔隙率及渗透性,改善微观结构[19]。微波预处理利用电磁场使物料内部直接产热,在冻干前即可实现部分脱水[20]。刘进洁等人研究发现,当微波功率 320 W、时间 90 s、糖液质量分数 20%时,桃脆片孔隙均一,硬脆度理想,产出率 13.54%,复水比 9.04%,关键香气物质含量最高[21]。高压脉冲电场预处理借助电穿孔原理提高细胞通透性,超高压技术可在低温下高效杀灭多数微生物,能最大限度地保留食品的原有色泽及风味[11]。

## 4.2. 联合干燥技术

联合干燥是将真空冷冻干燥与其他干燥技术有机结合的创新策略,旨在发挥不同技术的互补优势——利用 VFD 的高品质保留能力,同时借助其他技术的快速脱水能力弥补其效率低的缺陷。微波-电能联合冻干方面,联合干燥时间从单纯冻干的 16 h 缩短至 7 h,能耗降低 48.8%,Vc 保留率超 95%,产品色泽形态接近冻干产品,复水性稍优[20]。真空冷冻-微波真空联合干燥方面,岳丹华等比较了六种干燥方法对猕猴桃脆片品质的影响。结果表明,VFD 脆片组织形态最好,收缩率仅 13.24%,复水率达 306.07%,抗氧化活性高;风味上醇类、酮类含量较高,果香清香突出,而其他高温处理产生焦香、脂香,说明美拉德反应赋予新风味[22]。热风-真空冷冻联合干燥能提升干燥效率和产品质量。以 Vc 含量为响应值,优化得到黄花菜最佳工艺:热风温度 69.91℃、中间转换含水率 40.97%、加热板温度 45.24℃ [19]。在方便米面制品中,真空冷冻干燥能有效保持产品原有品质,冻干产品蓬松多孔、复水性好,在保留营养、防止氧化、保持形态等方面具有明显优势[23]。

## 4.3. 智能化控制技术

由于工业 4.0 及智能制造理念得到大力推广,真空冷冻干燥设备的智能化控制水平已经有了很大提高。

冻干显微镜(FDM)将显微成像与温、压控制二者完美结合,因而能直接、可靠地观察冰晶形貌、孔隙演化及塌陷起始,也便于准确测定塌陷温度(Tc)。目前光透射型 FDM (Linkam FDCS196)技术十分成熟,而新近发展的 OCT-FDM 从三维微观角度收集数据,在更接近真实生产条件下给出了更可靠的 Tc 测量结果[24]。

人工智能及机器学习的应用是十分明确的趋势,因此智能化 FDM 系统已经很自然、合理地把传感技术、控制算法、数据分析三者结合起来,对温度、压力、微观形貌加以闭环自适应调控,且用 PID 控制算法实现了 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的温控精度[24]。

由于在线监控技术正在不断发展,而传统冻干中含水率的测定依靠经验,因此新型在线监控技术能实时、可靠地监测含水率、温度及质量变化,能准确地判断干燥进程[13]。

## 5. 展望与未来趋势

### 5.1. 连续化与规模化

从间歇式生产向连续式生产转型是冻干技术产业升级最明确、最重要的方向,因此连续式冻干设备的研发必然要突破现有生产效率的瓶颈,也有利于实现规模化、批量化生产。福建省漳州市目前已形成有特色、有优势的冻干食品产业集群,全市有近 30 家冻干食品企业,年产值超 20 亿元,已有及计划投建的冻干食品生产线已达 160 条[25]。在连续化生产技术成熟以后,冻干食品的单位成本将大幅下降,其技术便能从高端小众市场顺利进入大众消费市场。

## 5.2. 智能化与数字化

人工智能、机器学习技术对冻干工艺开发及管理都产生了实质性的影响，傅俊元等对此做了详细阐述：今后智能化 FDM 系统将有工艺自学习能力，能从历史运行数据中自动优化温度曲线、真空度设定及转换点位置，而以数字孪生技术为基础的虚拟仿真平台又会极大缩短新产品工艺开发周期，更难得的是其结合高精度 PID 控制与图像识别算法，可切实提高冻干设备的控温精度及数据解析的客观性[24]。

## 5.3. 精准营养与产品多样化

冻干食品从第一代天然产品开始已经很自然、有序地演进到第二代调味产品、第三代重组产品，现正在向第四代、第五代精准营养产品稳步前进：第四代是为特殊人群、特殊用途、特殊环境设计的营养健康产品，第五代是以大数据为基础做个性化营养调控的精准定制产品[26]。因此，利用冻干技术定向保留、合理配比营养成分，极有利于开发针对婴童、老年人、慢病患者等群体的个性化功能食品[27]。更重要的是，已有研究证实复配技术能极大改善蓝靛果冻干制品的风味品质，由此也为寒地浆果开发提供了明确的理论支撑[10]。

## 5.4. 绿色低碳发展

由于“双碳”目标的有力推进，真空冷冻干燥技术正在向节能环保方向发展，因此今后以绿色节能技术、生物载体系统、智能控制技术三者融合及联合干燥模式深度开发为基础，有利于高附加值调味料真正进入大众消费市场[16]。微波-电能联合冻干技术可切实降低果蔬冻干生产成本，也从而提高企业的市场竞争力[20]。

由于 VFD 设备自身正在向小型化、模块化、节能环保、智能化诸种方向健康发展，因此模块化设备很自然地能根据不同生产规模、不同谷物种类的需要加以定制，又可将杀菌、脱水、杀虫诸种加工功能很好地集成起来，堪称食品加工行业的理想选择[21]。

## 5.5. 前沿应用领域拓展

真空冷冻干燥技术正在从传统的食品加工领域向更广阔的前沿领域扩展：冻干食品重量由于只有鲜品的 5%~10%，常温下又可保存 5 年以上，已成为灾害救援物资的首选。与此同时，冻干技术已在深空探索领域找到十分重要的应用，即制备太空食品。国内方便面龙头企业已经把航天 FD 冻干技术成功应用于方便面配料中[28]。冻干技术在中药领域也已有十分明确、扎实的科学支持，杜叶等论证了真空冷冻干燥能很好保留三七的活性成分、色泽、药性及药味，且能避免细胞机械损伤，最大限度减少细胞内成分流失[29]。

## 5.6. 市场规模与产业前景

从市场发展的角度看全球冻干食品市场处在持续扩容的上升周期，美国每年消费冻干食品 600 万吨，日本 200 万吨，法国 160 万吨，而日本、韩国两国每年从国外进口冻干食品总额已达 500 亿美元。2020 年我国冻干食品增速比全球冻干食品 7.8% 的增速还要高，发展势头十分强劲[28]。第二届中国冻干食品产业峰会期间共签约项目 22 个，签约金额超 40 亿元，国内首个以“冻干食品产业园”命名的园区也在福建漳州正式揭牌成立[25]。

## 6. 主要挑战与当前完善方向

尽管 VFD 技术在品质保留方面优势显著，但仍面临若干挑战。

## 6.1. 能耗与成本高

冻干过程需长时间维持低温和真空，其投资和运行成本是热风干燥的 3~5 倍。当前改善路径包括：构建多尺度水分迁移动力学模型，为缩短周期提供理论依据；采用多级真空系统，可使干燥时间缩短 20% 以上，能耗降低 30% 以上[18]。

## 6.2. 设备投资大且智能化不足

高质量真空、制冷和控制系统成本高昂，连续式设备尚不成熟[30]。对此，冻干显微镜(FDM)技术正在提供解决方案。FDM 可实时观测冰晶形态和塌陷起始，精确测定塌陷温度(Tc)，为精准优化工艺提供关键数据，采用 PID 控制算法的温控系统已能实现 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的精度[24]。

## 6.3. 产品结构相对单一

当前产品多为单一原料直接冻干，缺乏个性化精准营养产品[26]。完善方向包括：通过复配技术调控风味与营养品质[10]；研究不同干燥方式下组分多尺度结构变化对品质的影响机制，为产品多元化开发提供理论基础[23]。

## 7. 结语

由于真空冷冻干燥技术正在从单一脱水方法向集成化、智能化、精准化制造系统顺利演变，又恰逢消费升级、科技迅猛发展的时期，故而该技术在营养保留、资源利用、个性化产品开发诸方面的价值都得到充分挖掘，预处理节能、联合干燥、智能控制等方向都取得了切实有效的突破，能耗与成本的瓶颈因而缓解。展望未来，随着连续化产线瓶颈的突破、智能控制策略的普及以及多物理场协同干燥技术的成熟，真空冷冻干燥将有机会突破“高端小众”的应用边界，迈向更广泛的产业场景，成为驱动食品工业提质升级的一项关键支撑技术。

## 参考文献

- [1] 王鹏飞, 陈佳怡, 朱佳怡. 冻干技术在食品领域应用的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(22): 143-146.
- [2] 樊永华. 低温冻干工艺赋能特色食品加工[N]. 中国食品报, 2025-06-11(007).
- [3] 张宗锐, 刘运怡, 陈小芹, 等. 真空冷冻干燥技术在果蔬加工中的应用[J]. 食品安全导刊, 2022(24): 180-183.
- [4] 史硕利. 真空冷冻干燥食品加工工艺分析[J]. 现代食品, 2021(9): 71-73.
- [5] 张聪. 龙葵果真空冷冻干燥工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2025.
- [6] 岳军. 真空冷冻干燥食品的加工工艺研究[J]. 食品安全导刊, 2021(18): 157+160.
- [7] 张卫卫, 王静, 石勇, 等. 真空冷冻干燥食品加工技术研究[J]. 食品安全导刊, 2020(27): 161.
- [8] 乔虹. 基于安全营养视角的食品加工工艺分析[J]. 中外食品工业, 2025(5): 5-7.
- [9] 董焯, 张佳璇, 钱怡霖, 等. 不同干燥方式对膨腹海马干燥特性及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2026, 47(6): 80-87.
- [10] 张雅欣, 胡佳星, 李旋, 等. 基于复配的蓝靛果冻干风味协同调控[J]. 食品科学, 2025, 46(21): 190-200.
- [11] 夏霞. 新食品加工技术对食品营养的作用研究[J]. 食品安全导刊, 2021(27): 165-166.
- [12] 张桂芝, 吴小禾, 黄裕豪, 等. 冻干技术在火龙果加工上的应用[J]. 现代食品, 2021(15): 92-95.
- [13] 吴雨豪, 吕瑞玲, 周建伟, 等. 真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 85-95.
- [14] 李乐毅, 刘淑琴, 王盛春, 等. 辐照技术对宠物食品冻干鸡肉丁品质的影响[J]. 现代畜牧兽医, 2021(1): 23-27.
- [15] 徐宇迪, 钟子韵, 曾嘉任, 等. 冻干酸奶块的研究现状与发展[J]. 农产品加工, 2025(16): 100-103.
- [16] 李松娜. 冷冻干燥技术在调味品开发中的应用探索[J]. 食品工业, 2026, 47(1): 184-186.

- [17] 张雪丽, 许成举, 李宁阳, 等. 基于加工工艺条件优化的石榴风味核桃冻干食品研究[J]. 农业与技术, 2025, 45(8): 38-42.
- [18] 郭靖, 王秉智. 复合果蔬加工中真空冷冻干燥技术应用问题及对策[J]. 食品安全导刊, 2024(23): 182-184+189.
- [19] 洪扬, 史培, 李佳, 等. 干制黄花菜加工工艺及其干燥技术研究进展[J]. 农畜产品加工学报, 2025, 45(1): 47-53.
- [20] 金敬红, 孙晓明, 姚正颖, 等. 微波-电能联合冻干对南瓜干燥速度和品质的影响[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(9): 28-32.
- [21] 刘进洁, 杨茗曦, 屈非凡, 等. 微波辅助糖液浸渍对桃冻干脆片品质的影响[J/OL]. 农产品加工, 1-7. <https://link.cnki.net/urlid/14.1310.S.20260323.1140.008>, 2026-04-04.
- [22] 岳丹华等. 联合干燥方法对猕猴桃脆片品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 159-170.
- [23] 马天娇, 刘晋, 孟令卿. 干燥技术在方便米面制品加工中的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(9): 144-151.
- [24] 傅俊元, 赵巍, 马丹萍, 等. 冻干显微镜及其在真空冷冻干燥应用的研究进展[J/OL]. 化工进展, 1-10. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZO6hV6rGk-bS0yOHD11krq9uPEKpiGOjzCf1B5RoByc2qZTkQOK-Muz\\_Vw8NNdEdt1xtXedTlo\\_jygpzKQFcmLS5Vt-tZjbIGvuFbqu8ErtptkWf6SV0Ght-LfRNu9nL5MZHqwZ8m8OfYJ1xh7IBXDrH2nC5DOVWR19u0VBTiRIPmEQ-cKRfn7kA==&uniplat-form=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZO6hV6rGk-bS0yOHD11krq9uPEKpiGOjzCf1B5RoByc2qZTkQOK-Muz_Vw8NNdEdt1xtXedTlo_jygpzKQFcmLS5Vt-tZjbIGvuFbqu8ErtptkWf6SV0Ght-LfRNu9nL5MZHqwZ8m8OfYJ1xh7IBXDrH2nC5DOVWR19u0VBTiRIPmEQ-cKRfn7kA==&uniplat-form=NZKPT&language=CHS), 2026-04-04.
- [25] 方雯荣. 冻干食品: 做强技术做优品牌做大产业[N]. 中国食品报, 2023-04-25(001).
- [26] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 414-421.
- [27] 李勇. 真空冷冻干燥法在谷物干燥中的应用[J]. 农机使用与维修, 2025(6): 124-126.
- [28] 王薇. 冻干食品成为行业新风口[N]. 中国食品报, 2021-10-25(002).
- [29] 杜叶, 伍文彬, 刘涛. 基于中药临床给药载体的演变探讨中药高压饮片应用的可行性[J/OL]. 中国抗生素杂志, 1-9. <http://doi-org-s.webvpn.lsnu.edu.cn:9122/10.13461/j.cnki.cja.008135>, 2026-04-04.
- [30] 冯雅, 戴浩然, 郭少聪, 等. 食品真空冻干技术的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2022(16): 177-179.