刘战霞, 贾文婷, 杨慧, 等. 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 49−58. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040103

LIU Zhanxia, JIA Wenting, YANG Hui, et al. Effect of Different Natural Additives on the Quality of De-sgared Freeze-dried Jujube Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 49−58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040103

·特邀主编专栏—果蔬基料制造:基础理论、新型加工、质量控制与智能制造(客座主编:徐贞贞、王永涛、李涛;产业顾问:李仁杰)·

不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉品质的影响

刘战霞[1], 贾文婷[1], 杨　慧[1,2,*], 吴洪斌[1,*]

(1.新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆石河子 832000;
2.乌鲁木齐市农产品质量安全检测中心, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘　要: 以新型天然助剂(乳清蛋白、甜菊糖苷、副干酪乳杆菌)及其复合天然助剂通过不同比例的组合复配, 制备真空冷冻干燥脱糖枣粉, 分析真空冷冻干燥脱糖枣粉的物理性质、功能性成分、抗氧化能力和感官特性, 研究不同天然助剂组合得到的真空冷冻干燥脱糖枣粉的性能。结果表明, 添加适当的天然助剂可以显著改善真空冷冻干燥脱糖枣粉的湿润性、溶解度和抗氧化能力。其中天然助剂添加配方 JP-WSL1(枣粉:乳清蛋白:甜菊糖苷:副干酪乳杆菌的比例为 7:1:1.5:0.5)的色泽最佳, 平均粒径最小(6.25 μm), 水分含量最低(6.67%±0.04%), 接触角(39.51°±1.66°)最小, 湿润时间较大(66.28±1.42 s), 溶解度最高(57.96%±0.51%); 总酚含量(Total Phenolic Content, TPC)、总黄酮含量(Total Flavonoid Content, TFC)分别达到 1332 mg GAE/100 g、462 mg RE/100 g、DPPH 自由基清除率和 $ABTS^{+}$自由基清除率也均达到最高, 分别达到 49.32% 和 36.2%。综上所述, 以 JP-WSL1 为天然助剂添加配方更适用于生产真空冷冻干燥脱糖枣粉。本研究为真空冷冻干燥脱糖枣粉的工业化生产提供了可靠的理论支持, 为真空冷冻干燥技术在果蔬冲调粉深加工领域的应用提供了基础。

关键词: 真空冷冻干燥脱糖枣粉, 真空冷冻干燥, 天然助剂, 功能性成分, 抗氧化能力, 感官特性

中图分类号: TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0049−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040103

本文网刊:

Effect of Different Natural Additives on the Quality of De-sgared Freeze-dried Jujube Powder

LIU Zhanxia[1], JIA Wenting[1], YANG Hui[1,2,*], WU Hongbin[1,*]

(1.Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China;
2.Inspection Center of the Agricultural Quality and Safety in Urumqi, Urumqi 830000, China)

Abstract: By combining new natural additives (whey protein, steviol glycosides, and *Lactobacillus paracasei*) in various proportions, de-sugared freeze-dried jujube powder was prepared. The physical properties, functional components, antioxidant capacity, and sensory characteristics of the de-sugared freeze-dried jujube powder were analyzed, and the performance of the de-sugared freeze-dried jujube powder obtained from different natural additive combinations was studied. The results showed that adding appropriate natural additives can significantly improve the wetting, solubility, and antioxidant capacity of the de-sugared freeze-dried jujube powder. Among these, the formulation JP-WSL1 (jujube

收稿日期: 2025−04−09

基金项目: 新疆生产建设兵团青年科技创新人才项目(2023CB007-02)。

作者简介: 刘战霞(1992−),女,硕士,副研究员,研究方向:农产品加工及副产物综合利用,E-mail:806796383@qq.com。

*** 通信作者:** 杨慧(1986−),女,硕士,副研究员,研究方向:农产品加工与副产物利用研究,E-mail:517586505@qq.com。

吴洪斌(1980−),男,硕士,研究员,研究方向:果蔬/油料精深加工及副产物综合利用,E-mail:wuhongbin1980@126.com。

powder∶whey protein∶steviol glycosides∶*Lactobacillus paracasei* ratio of 7∶1∶1.5∶0.5) had the best color, the smallest average particle size (6.25 μm), the lowest moisture content (6.67%±0.04%), the smallest contact angle (39.51°±1.66°), the longest wetting time (66.28±1.42 s), and the highest solubility (57.96%±0.51%). The total phenol content (TPC), total flavonoid content (TFC), DPPH free radical scavenging ability, and $ABTS^{+}$ free radical scavenging ability also reached their highest levels, at 1332 mg GAE/100 g, 462 mg RE/100 g, 49.32% and 36.2%, respectively. In summary, the formulation with JP-WSL1 as a natural additive was more suitable for the production of de-sugared freeze-dried jujube powder. This study provides reliable theoretical support for the industrial production of de-sugared freeze-dried jujube powder and lays the foundation for the application of vacuum freeze-drying technology in the deep processing of fruit and vegetable powder.

Key words: desugared freeze-dried jujube powder; vacuum freeze-drying; natural additives; functional components; antioxidant capacity; sensory characteristics

枣(*Zizyphus jujuba* Mill.)属于鼠李科枣属植物,主要分布在中国等亚洲地区[1]。鲜枣水分含量较高,口感脆爽,富含多种维生素、矿物质、氨基酸、有机酸、膳食纤维和糖类,还含有大量多酚类、三萜类和生物碱等生物活性物质,具有抗炎、抗氧化和抗癌等生物活性功能,深受人们喜爱[2]。然而,新鲜成熟的枣果鲜果汁液多,含可溶性固形物含量高,采后易受到微生物的侵染而发生腐烂变质,不易贮藏。干制加工技术通过降低枣果水分活度(Aw<0.6)抑制微生物繁殖,同时减缓脂质氧化、酶促褐变等劣变反应,成为延长贮藏期的关键手段[3]。其中,真空冷冻干燥技术既能最大程度保留鲜枣的细胞结构与挥发性风味物质,又能减少热敏性营养成分的降解,营养保留率可达 90% 以上[4]。以此制备的枣粉不仅具备便于储运、理化性质稳定的优势,还可通过微胶囊包埋等技术拓展其在功能食品、膳食补充剂中的应用场景,展现出较高的产业开发价值[5]。

枣粉(Jujube powder, JP)作为典型的高糖基功能性粉体,其碳水化合物组成以蔗糖(18%~22%)、葡萄糖(25%~30%)和果糖(28%~32%)为主。研究表明,无定形态小分子糖的玻璃化转变(Tg 值约 52~68 ℃)是引发粉体吸湿性改变的核心机制[6]。这种物理劣变不仅导致粉体流动性指数(Carr 指数>35%)显著下降,还会因潮解引发美拉德反应加速、维生素 C 降解率提升等问题,直接影响产品的食用便利性与营养生物利用率[7]。前期研究发现,在干燥前进行超声辅助酶法去糖处理,在保证产品品质的同时,脱去部分糖分即可抑制结块、粘结[8]。枣粉脱糖主要针对游离糖(如蔗糖、葡萄糖、果糖),这类糖因高吸湿性易导致产品结块,脱糖过程中,蔗糖、葡萄糖、果糖等主要游离糖成分会显著降低,而对功能性多糖等成分保留率较高,伴随游离糖减少,枣粉吸湿性明显下降——因游离糖分子与水分子结合能力减弱,平衡吸湿量可降低 30% 以上。吸湿性降低直接减少粒子间因水分介导的粘结力,使枣粉在储存、运输及加工中结块、粘结现象大幅减轻,最终通过定向脱除高风险游离糖、量化指标验证脱糖效果、关联特性改善逻辑,获得稳定性显著提升的脱糖冻干粉[7]。

随着消费者对食品天然化、健康化需求的攀升,以乳清蛋白、甜菊糖苷、菊粉等兼具益生功能的天然活性成分替代传统合成抗结剂[9−10],已成为食品助剂领域的重要研究方向。生产中大多向枣粉成品中添加硬脂酸镁、硬脂酸钙、二氧化硅等抗结块剂,减少粘结结块程度,但是这种方式与目前市场上对于绿色健康食品的需求相违背。在实际应用探索中,众多学者致力于开发新型天然复合助剂体系。郑先哲等[11]为保证低温喷雾干燥后蓝靛果粉品质,研究复合助剂(麦芽糊精、β-环糊精和乳清蛋白)对喷雾干燥蓝靛果粉理化性质的影响,获得了最佳试验点复合助剂比例:麦芽糊精质量比例 72.9%,β-环糊精质量比例为 12.5%,乳清蛋白质量比为 14.6%,改善了蓝靛果粉综合品质。

为探究不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉品质的影响,通过降低红枣粉糖分,结合复合助剂对红枣粉进行处理,达到有效降低红枣粉吸水率,提高红枣粉抗结块效果的目的。本研究聚焦真空冷冻干燥脱糖枣粉加工中天然助剂的精准应用,突破传统脱糖工艺仅依赖物理方法或单一助剂的局限,系统对比不同种类天然助剂在脱糖过程中对枣粉理化特性、营养保留、抗氧化能力及感官品质的差异化影响,为开发高品质功能性脱糖枣粉提供兼具创新性和实用性的工艺优化思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

灰枣 选取大小均一、无裂、无损伤及病虫害的挂熟灰枣,采购于新疆第三师阿拉尔市,初始含水率约为 70%±1%,将清洗干净的灰枣去核,用切片机切成厚度为 4~5 mm 薄片,并保存在 4 ℃ 备用;乳清蛋白、甜菊糖苷、副干酪乳杆菌 纯度均为 99%,安徽新圣生物有限公司。

CIENTZ-30ND 冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司;BPG-9240A 恒温干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;WSC-2S 色度计 上海仪电物理光学仪器有限公司;DK-98-ⅡA 型数显恒温水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司;winner2000ZD 激光粒度分析仪 济南微纳颗粒仪器股份有限公司;

VCA25 界面粘弹测量仪　北京奥德利诺仪器有限公司；NMI20-015V-I 型低场核磁共振分析仪　苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　超声辅助酶法对灰枣切片预处理　枣片去糖处理采用了文献 [8] 所述的方法并稍加调整。将 500 g 枣片置于水浴锅中，在 25 ℃ 下水浴提取 1 h、料液比 1∶50（m/V，g/mL）、果胶酶 10000 U/g，使用超声波浴（40 kHz）对其进行去糖 60 min，将溶有糖类物质的去离子水去除，吸干表面水分后，超声加热快速升温灭酶（超声功率 300 W，频率 25 kHz，处理时间 90 s、灭酶温度 85 ℃），存于−30 ℃ 冻存备用。

1.2.2　真空冷冻干燥脱糖枣粉的制备　参考杨忻瑞等[12] 的方法，略作修改。将脱糖处理后的灰枣片放室温下自然解冻后用粉碎机粉碎，向枣粉中按照一定质量比例添加新型天然助剂（乳清蛋白（Whey Protein，WP）、甜菊糖苷（Stevioside，ST）、副干酪乳杆菌（*Lactobacillus* paracasei，LP）），搅拌均匀后，分装于平皿中（填料高 1 cm 左右）。采用真空冷冻干燥设备对添加不同天然助剂后的枣粉进行干燥，放于 −80 ℃ 冰箱中冷冻 12 h，最后放入真空冷冻干燥机中干燥 24 h，真空度控制在 15 Pa 左右。冻干至水分质量分数低于 5%。干燥样品经粉碎机粉碎 15 s，得到枣果冻干粉，粉体粒径在 60 目左右。冻干完成后收集各灰枣果冻干粉，用研钵磨粉后保存于封口袋中，贮存于 4 ℃，备用。以未添加新型天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉为对照，记为 JP。

1.2.3　不同天然助剂添加量的确定　向枣粉中按照为 7∶3 质量比例（质量百分比）添加单一天然助剂 WP 及复合新型天然助剂 WP-ST、WP-LP、WP-ST-LP，分别记为 JP-WP、JP-WS、JP-WL、JP-WSL1、JP-WSL2，具体制备配方如表 1 所示，分别考察不同天然助剂添加量对真空冷冻干燥脱糖枣粉的物理性质、功能性成分、抗氧化能力和感官特性的影响。

表 1　不同天然助剂添加量配方

Table 1　Formulations with different additives of natural origin

组 别	质量百分比(%)			
	JP	WP	ST	LP
JP-WP	70	30	−	−
JP-WS	70	15	15	−
JP-WL	70	15	−	15
JP-WSL1	70	10	15	5
JP-WSL2	70	10	10	10
对照(JP)	100	0	−	−

1.2.4　真空冷冻干燥脱糖枣粉物理特性的测定

1.2.4.1　色差的测定　使用色度计测定样品亮度（L^*）、红色值（a^*）和黄色值（b^*）。总色差计算如下：

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \qquad \text{式（1）}$$

其中，L_0^*、a_0^*和b_0^*为真空冷冻干燥脱糖枣粉的色度值；L^*、a^*和b^*为添加天然助剂真空冷冻干燥脱糖枣粉的色度值。

1.2.4.2　粒径分布　使用激光粒度分析仪测量分散于水中的枣粉粒度分布[13]。通常以 $D_{[4,3]}$ 表示平均体积直径，按照公式（2）计算。

$$D_{[4,3]} = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i d_i^4}{\sum_{i=1}^{n} n_i d_i^3} \qquad \text{式（2）}$$

式中，n_i 表示直径为 d_i 颗粒的数量。

用跨度指数表征粒度分布，跨度的值越接近 1 表明越窄的粒径分布。跨度指数计算公式为：

$$\text{span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \qquad \text{式（3）}$$

式中，D_{90}、D_{50} 和 D_{10} 分别表示累计粒度百分数达到 90%、50%、10% 时所对应的粒径。

1.2.4.3　水分含量的测定　参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的直接干燥法。测定在 105 ℃ 下样品干燥过程中的质量损失，直到样品质量恒定。样品水分含量计算公式如下：

$$\text{水分含量}(\%) = \frac{m_{\text{干燥前}} - m_{\text{干燥后}}}{m_{\text{干燥前}}} \times 100 \qquad \text{式（4）}$$

1.2.4.4　低场核磁共振（LF-NMR）　使用 LF-NMR 分析仪测定真空冷冻干燥脱糖枣粉的横向弛豫时间（T_2）。将样品放入 LF-NMR 检测专用玻璃管（外管直径为 25 mm）中，然后将玻璃管插入磁场中心位置，利用 CPMG（Carr Purcell-Meiboom-Gill）序列捕获衰减信号。设置 CPMG 参数：90°脉宽为 12.8 μs、180°脉宽为 22.4 μs、等待时间为 700 ms、回波时间为 0.2 ms、回波次数为 5000，并重复扫描 8 次，最终构建 T_2 分布曲线。

1.2.4.5　接触角　使用接触角界面粘弹测量仪通过座滴法测量粉体与去离子水间接触角。用压片机将样品压成薄片置于载物台上，将装有去离子水的注射器置于发射架上，记录液滴与样品接触的全过程，并测得样品接触角。

1.2.4.6　湿润时间　根据 Qadri 等[14] 的方法测定真空冷冻干燥脱糖枣粉的湿润时间，将外管径为 1 cm 的玻璃漏斗固定于烧杯上方，取 100 mL 25 ℃ 去离子水倒于 200 mL 烧杯中，然后通过漏斗向烧杯中加入 1 g 粉末，用秒表记录粉末完全湿润所需要的时间。

1.2.4.7　溶解度　真空冷冻干燥脱糖枣粉溶解度的测定参考 Xia 等[15] 的方法并稍作修改。将 1 g 粉末样品溶解于 100 mL 去离子水中，使用磁力搅拌器以 500 r/min 搅拌 5 min 后取出。并将溶液置于离心管中，以 3000 r/min 离心 5 min。离心后取上清液（25 mL）并转移至玻璃皿中，放入恒温干燥箱中 105 ℃ 干燥至恒重，溶解度计算公式为：

$$溶解度(\%)=\frac{m_{上清液}}{m_{样品}}\times 100 \quad 式（5）$$

1.2.4.8 吸湿率的测定 参照文献 [7] 的方法，称取 0.5 g 真空冷冻干燥脱糖枣粉加入已恒重的玻璃培养皿中，将培养皿置于温度 25 ℃、湿度 75% 的恒温恒湿培养箱中，4、8、12、24 h 取出称重。吸湿率的计算公式如下：

$$吸湿率(\%)=\frac{m_{吸湿后总质量}-m_{空玻璃皿质量}-0.5}{0.5}\times 100 \quad 式（6）$$

1.2.5 真空冷冻干燥脱糖枣粉生物活性成分及抗氧化能力的测定

1.2.5.1 营养成分的测定 参照 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》对真空冷冻干燥脱糖枣粉的维生素 C 含量进行测定；多糖的提取参照文献 [16] 的方法，稍作修改。精密称取粉碎后的真空冷冻干燥脱糖枣粉样品 1.00 g，加入蒸馏水，料液比为 1∶30，在 90 ℃ 的恒温水浴锅中浸提 1 h，40 ℃ 超声浸提 1 h 后抽滤，然后旋转蒸发至 10 mL，加无水乙醇至溶液乙醇体积分数为 80%，在 4 ℃ 环境中放置 24 h 进行醇沉，抽滤取沉淀，并离心滤液取沉淀，合并沉淀，加蒸馏水定容至 100 mL，用该提取液测定多糖含量（Polysaccharide Content，PC）。采用紫外-可见分光光度计测定 490 nm 波长下的吸光度（A 值）。以葡萄糖浓度（mg/L）为横坐标，吸光度为纵坐标绘制标准曲线，曲线方程为 y=0.0172x+0.0041，决定系数 R^2=0.9995。精密量取提取液 0.5 mL，置具塞试管中，加水 1.5 mL，按照标准曲线制备项下的方法，测定 A 值，代入标准曲线，多糖含量以葡萄糖测定值（mg/g）表示。

1.2.5.2 总酚含量（TPC） 采用 Folin-Ciocalteu 法测定样品 TPC[16]。称取 1 g 真空冷冻干燥脱糖枣粉，加入 25 mL 80% 甲醇溶液，在室温下振摇 30 min，6000 r/min 离心 15 min，收集上清液存于 −20 ℃ 下。取 1 mL 甲醇提取液与 5 mL Folin-Ciocalteu 试剂（10%，v/v）和 4 mL 7.5% 碳酸钠溶液混匀，室温下静置 1 h，测量在 765 nm 处吸光度。结果以没食子酸当量（GAE）计。

1.2.5.3 总黄酮含量（TFC） 根据文献 [8] 的方法并稍作修改，采用 $NaNO_2$-$Al(NO_3)_3$ 比色法测定样品 TFC。取 1 mL 甲醇提取液与 0.4 mL 5% $NaNO_2$ 溶液混匀静置 6 min 后，加入 0.4 mL 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液混匀静置 6 min，然后加入 4 mL 4% NaOH 溶液并定容至 10 mL，摇匀后静置 15 min，测量在 510 nm 处吸光度。以芦丁为标准品绘制标准曲线并计算 TFC，结果以芦丁当量（RE）计。

1.2.5.4 DPPH 自由基清除能力 根据 Shao 等[17] 的方法测定，略作修改。实验组将 100 μL 样品甲醇提取液与 100 μL 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液混合，避光静置 30 min，测量在 517 nm 处吸光度。对照组将 100 μL 样品甲醇提取液与 100 μL 甲醇混合，空白组将 100 μL 甲醇与 100 μL DPPH 溶液混合，避光静置 30 min，测量在 517 nm 处吸光度，计算公式为：

$$DPPH\ 自由基清除能力(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad 式（7）$$

式中，A_1 为实验组的吸光度；A_2 为对照组的吸光度；A_0 为空白组的吸光度。

1.2.5.5 $ABTS^+$ 自由基清除能力 根据 Shao 等[17] 的方法测定，略作修改。将浓度为 4 mmol/L 的 ABTS 溶液与浓度为 6 mmol/L 的 $K_2S_2O_8$ 溶液以 1∶1 的比例混合，避光反应 12 h，然后用去离子水稀释，使其在 734 nm 处吸光度为 0.7±0.02，得到 ABTS 工作液。实验组是将 100 μL 样品甲醇提取液与 100 μL ABTS 工作液混合，静置 6 min，测量在 734 nm 处吸光度。以甲醇代替样品甲醇提取液作为空白组。$ABTS^+$ 自由基清除能力计算公式如下：

$$ABTS^+自由基清除能力(\%)=\left(\frac{A_C-A_S}{A_C}\right)\times 100 \quad 式（8）$$

式中，A_C 为空白组的吸光度；A_S 为实验组的吸光度。

1.2.6 真空冷冻干燥脱糖枣粉的冲调及感官评价 参考王勋等[18] 的方法并稍作修改进行。按照将真空冷冻干燥脱糖枣粉和水（60±5 ℃）按 10∶90（真空冷冻干燥脱糖枣粉∶水，w/v）的比例混合均匀，得到真空冷冻干燥脱糖枣粉冲调饮料，待饮料冷却后，提供给感官评价小组。果粉和水的比例由预实验确定。感官评价小组由 18 名受过专业训练的食品专业成员组成（11 名女性，7 名男性，22~35 岁）。然后采用（9 标度喜好评价系统）对样品的颜色、气味、滋味和总体可接受度进行评价，范围从非常不喜欢=1 到非常喜欢=9。

1.3 数据处理

每组实验重复 3 次。使用 SPSS 29.0 对数据进行 ANOVA 分析和 Tukey 检验，当 P<0.05 时为差异显著。使用 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉物理性质的影响

2.1.1 色泽 颜色参数是影响食品可接受度的一个重要指标[8]。图 1 为不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的图像，其颜色参数结果如表 2 所示，对照（JP）的 L^* 值为 40.99±0.09，与 JP 相比，不同天然助剂处理的真空冷冻干燥脱糖枣粉 L^* 值都显著增加（P<0.05），表现出更高的亮度。其中，添加 JP-WSL1 的真空冷冻干燥脱糖枣粉 L^* 值最高，为 49.71±0.11，

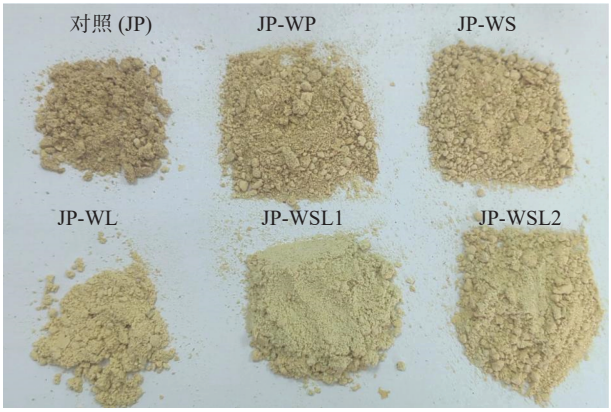


图 1　添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉对比图

Fig.1　Comparison diagram of sugar-removed freeze-dried jujube powder with different natural additives

表 2　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的颜色参数

Table 2　Color parameters of different natural additives on de-sugared freeze-dried jujube powder

样品	颜色参数			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
对照(JP)	40.99±0.09^{f}	19.62±0.14^{a}	22.58±0.24^{a}	0.00±0.00^{f}
JP-WP	44.11±0.01^{e}	18.12±0.02^{b}	21.83±0.03^{b}	2.87±0.12^{c}
JP-WS	47.72±0.04^{c}	15.86±0.02^{f}	22.19±0.03^{a}	2.58±0.14^{c}
JP-WL	45.92±0.01^{d}	16.48±0.03^{e}	21.06±0.03^{c}	2.27±0.15^{c}
JP-WSL1	49.71±0.11^{a}	17.14±0.13^{d}	21.01±0.18^{c}	6.67±0.08^{a}
JP-WSL2	48.39±0.23^{b}	17.93±0.31^{c}	21.51±0.65^{b}	5.64±0.08^{b}

注：数据表示为平均值±标准误差(n=3)；同列不同字母表示数值差异显著(P<0.05)。

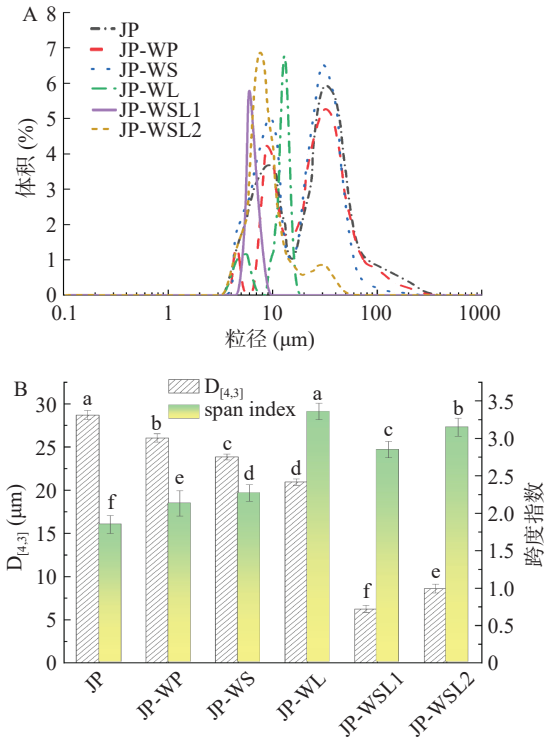


图 2　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的粒径(A)及 $D_{[4,3]}$、跨度指数(B)的影响

Fig.2　Effects of different natural additives on particle size (A) and $D_{[4,3]}$, span index (B) of desugared freeze-dried jujube powder

注：数据表示为平均值±标准误差(n=3)；不同字母表示数值差异显著(P<0.05)；图 3~图 8 同。

比 JP 提高了约 21%。a^*值表示红绿值，JP 的 a^*值为 19.62±0.14，表明其颜色偏红。添加不同天然助剂后，真空冷冻干燥脱糖枣粉的 a^*值均有所下降，说明天然助剂的加入使真空冷冻干燥脱糖枣粉的颜色向绿色方向偏移，其中添加 JP-WSL1 的真空冷冻干燥脱糖枣粉 a^*值最低，为 17.14±0.13，颜色偏绿程度最大。b^*值表示黄蓝值，JP 的 b^*值为 22.58±0.24，说明其颜色偏黄。与 JP 相比，添加不同天然助剂后，真空冷冻干燥脱糖枣粉的 b^*值均有所降低，表明天然助剂的加入使真空冷冻干燥脱糖枣粉的颜色向蓝色方向偏移，但偏移程度较小。表 2 中的ΔE 值分析表明，所有样品与对照组(JP)均存在显著颜色差异，其中 JP-WSL1(6.67±0.08)和 JP-WSL2(5.64±0.08)的 ΔE 值最大，说明它们的颜色差异最为明显，而其他样品的ΔE 值(2.27~2.87)虽显著(P<0.05)但相对较小。综合分析，不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉颜色参数的影响显著(P<0.05)，且不同助剂间存在差异，这可能与天然助剂的化学结构和性质有关。因此，从产品色泽上考虑，JP-WSL1 样品整体颜色的变化更偏向对产品有利的方向，更适用于生产真空冷冻干燥脱糖枣粉。

2.1.2　粒径及粒径分布　粒径是衡量颗粒物质大小的一个重要参数，粒径的大小直接影响到果粉的应用性能和最终产品的质量[19]。由图 2A 可知，仅有样品 JP-WSL1 表现为单峰分布，峰形较为对称，说明样品的粒径分布较为均匀[19]。添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉样品，其粒径分布存在显著差异，对照样品(JP)的粒径分布峰位于较大粒径区域，表明其颗粒较大。由图 2B 可知，添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉样品的 span 值(2.13±0.17 至 3.36±0.11)大于 JP 样品的 span 值(1.85±0.12)，二者的 span 值均>1。这是因为添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉是不同天然助剂与枣粉颗粒之间相互作用，改变了颗粒的聚集状态和大小分布，从而导致了更宽的粒径分布[20]。添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉样品的平均粒径相较于对照样品 JP 的平均粒径(25.67±0.78 μm)，均有不同程度的减小(P<0.05)。这表明添加天然助剂可以有效地减小真空冷冻干燥脱糖枣粉的粒径，使颗粒更加细腻，从而提高其溶解性和口感。其中，添加 JP-WSL1 的真空冷冻干燥脱糖枣粉样品具有最小的平均粒径，表明其颗粒最为细腻，可能具有更好的应用性能。

2.1.3　水分含量及水分状态　粉末样品的水分含量直接影响了样品的稳定性和耐藏性[21]。图 3A 反映了添加不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的水分含量。JP-WSL1 处理组水分含量(6.67%±0.04%)远低于对照组 JP 的水分含量(10.16%±0.05%)(P<0.05)。虽然 JP-WSL1 处理组的水分含量较低，但其

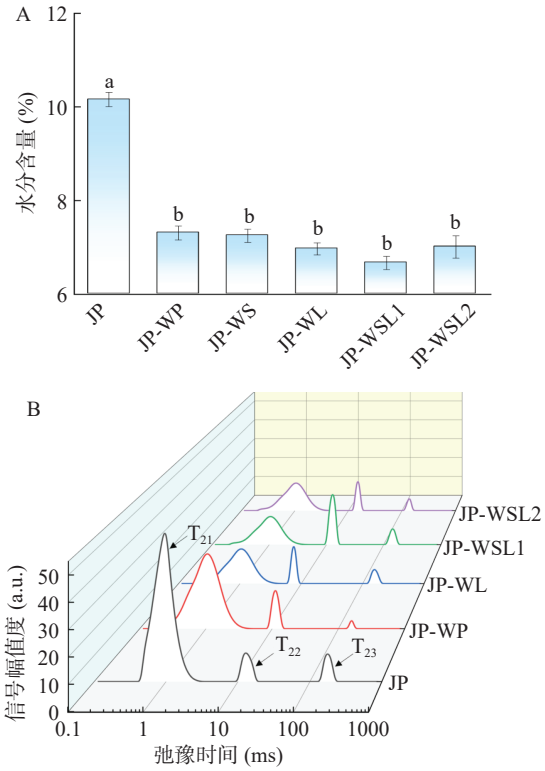


图 3 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的水分含量(A)和水分状态(B)的影响

Fig.3 Effects of different natural additives on the moisture content (A) and moisture state (B) of freeze-dried jujube powder

与其他添加天然助剂的样品相比，如 JP-WP、JP-WS、JP-WL、JP-WSL2，水分含量的差异并不显著($P>0.05$)。所有样品水分含量均低于 8%，这能最大限度地抑制粉末样品团聚和结块的现象，有利于提高样品稳定性和延长样品保质期[22]。

低场核磁共振(LF-NMR)是一种可以探测样品中氢质子的横向弛豫时间(T_2)的技术，可反映水分状态的变化。T_2 越短，表明水分子与底物结合越紧密，这意味着氢质子的自由度越低；反之，T_2 越长，氢质子的自由度越高[23]。由图 3B 可知，所有样品的 T_2 反演图谱均呈现出三个明显的峰，对照样品 JP 的 T_{21} 峰面积最大，表明其强结合水含量最高。与 JP 相比，添加不同天然助剂的样品 T_{21} 峰面积均有所减小，说明天然助剂的加入改变了真空冷冻干燥脱糖枣粉中水分的结合状态，使得强结合水的含量降低[24]。其中，JP-WSL1 处理组的 T_{21} 峰面积减小最为明显，这可能与该处理组水分含量的降低有关。同时，JP-WSL1 处理组的 T_{22} 峰面积显著增大($P<0.05$)，表明弱结合水含量增加。这一现象可能由以下机制所致：天然助剂的加入促进了水分子的重排，促使部分强结合水转化为弱结合水；与此同时，天然助剂在颗粒表面形成空间位阻或电荷排斥层，并通过调节水分活度抑制弱结合水的流动性[23]。这种双重作用使得即便弱结合水含量上升，仍能有效阻碍颗粒直接接触，进而减轻体系的团聚与结块现象。而 T_{23} 峰面积的变化则相对较小，说明不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉中自由水含量的影响有限。综合分析 T_2 反演图谱，可以推断出不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉水分状态的影响存在差异，这可能与助剂的种类、添加量以及其与枣粉颗粒的相互作用方式有关[25]。

2.1.4 接触角、湿润时间和溶解度 接触角是指样品表面与液滴接触点处切线的夹角，可以间接测量样品表面湿润性，接触角越小代表样品的湿润性越强[20]。湿润时间也是间接反映样品湿润性的重要指标，单位质量样品的湿润时间越短，表明样品的湿润性越强[26]。从图 4A 可看出，对照组 JP 样品的接触角和湿润时间分别比添加不同天然助剂的样品的小，表明添加不同天然助剂的湿润性更强。这是因为样品的湿润性会受到粉末的粒径的影响，添加不同天然助剂样品颗粒与水的相互作用增大，JP-WSL1 样品颗粒具有较小的粒径，不利于水分子渗透进入粉体结构，因此 JP-WSL1 湿润性较小。JP-WSL1 处理组接触角最小，为 39.51°±1.66°，湿润时间为 66.28±1.42 s，可能是 JP-WSL1 中样品与水的作用力增大，使样品的接触角和湿润时间减小。因此除粉末的粒径，粉末的表面组成也会对样品湿润性造成影响。

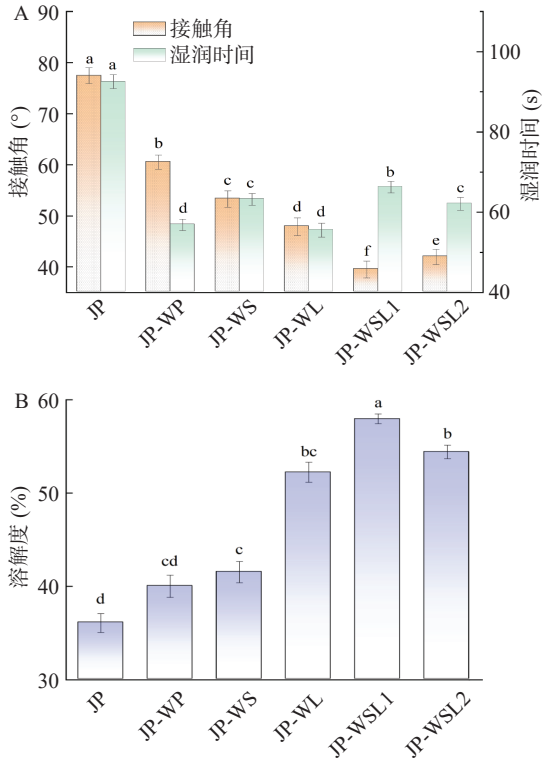


图 4 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的接触角、湿润时间(A)和溶解度(B)的影响

Fig.4 Effects of different natural additives on the contact angle, wetting time (A), and solubility (B) of desugared freeze-dried jujube powder

溶解度是评价粉末样品水合特性的重要指标，与真空冷冻干燥脱糖枣粉的实际应用密切相关，粉末样品的溶解度受样品组成成分和粒径等因素的影响，溶解度越高表明产品品质越高[15]。由图 4B 可知，真

空冷冻干燥脱糖枣粉的溶解度在 40.02%±1.19% 和 57.96%±0.51% 之间变化。本研究中样品的溶解度主要受样品组成成分的影响，研究发现添加不同天然助剂样品的溶解度明显高于对照组 JP 样品的溶解度（36.09%±1.01%）（P<0.05），可能是添加的天然助剂改变了样品颗粒的表面性质，使得水分子更容易与样品颗粒相互作用，从而提高了溶解度。因此，通过添加适当的天然助剂，可以显著改善真空冷冻干燥脱糖枣粉的溶解性能，根据接触角、湿润时间和溶解度的结果，以 JP-WSL1 作为天然助剂是生产真空冷冻干燥脱糖枣粉的最佳条件。

2.1.5　吸湿率　吸湿现象是冻干枣粉常见的问题，吸收水分后冻干枣粉会变得柔软并产生粘性，这将对其造粒、压片以及贮藏过程产生不利影响[27]。图 5 为添加不同天然助剂制备真空冷冻干燥脱糖枣粉的吸湿率，在 25 ℃，相对湿度 75% 的条件下，随着贮藏时间的延长，所有样品的吸湿率均呈上升趋势。在贮藏初期，所有样品的吸湿率增长较快，随后增长速度逐渐放缓。这可能是因为在贮藏初期，冻干枣粉表面的微孔结构较多，有利于水分的吸附，随着贮藏时间的延长，冻干枣粉表面的微孔逐渐被水分占据，吸湿速度减慢[28]。从图 5 可以看出，对照组 JP 样品的吸湿率最高，而添加不同天然助剂的样品吸湿率相对较低。其中，JP-WSL1 样品的吸湿率最低，相比 JP 组，相对降低了约 26.67%，这可能是因为 JP-WSL1 中的天然助剂能够有效阻塞冻干枣粉表面的微孔，减少水分的吸附，从而降低吸湿率[29]。综上，复合助剂对降低红枣粉吸湿率有至关重要的作用，复合助剂处理后，明显降低红枣粉吸湿率，从而降低结块量。

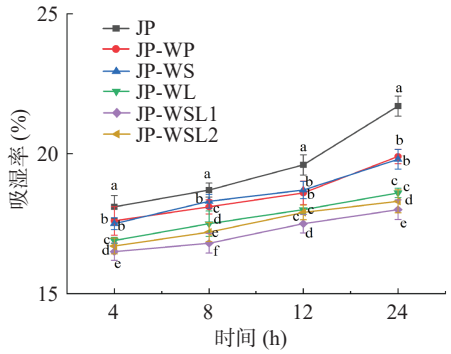


图 5　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的吸湿率

Fig.5　Moisture absorption rate of dehydrated jujube powder with different natural adjuvants

2.2　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉多糖和维生素 C 含量的影响

为了研究不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉中多糖和维生素 C（V_C）含量的影响，本研究测定了对照组（JP）及添加不同助剂的处理组（JP-WP、JP-WS、JP-WL、JP-WSL1、JP-WSL2）中多糖和 V_C 的含量。由图 6 可知，JP 组的多糖含量最高（16.22 mg/g），显著高于其他处理组（P<0.05），而 V_C 含量最低（5.39 mg/g），显著低于其他处理组（P<0.05），且各处理组间多糖和 V_C 含量均无显著差异。该结果表明，添加天然助剂的处理组能有效提高 V_C 含量，可能是因为复合助剂中的乳清蛋白、副干酪乳杆菌可为红枣粉补充更多营养成分，使其营养更丰富，且能够有效脱除部分多糖，说明天然助剂的选择对真空冷冻干燥脱糖枣粉中功能性成分的保留具有特异性影响，需根据实际需求优化助剂配方。

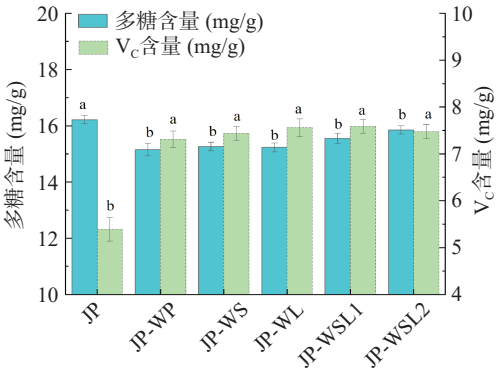


图 6　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的多糖和 V_C 的影响

Fig.6　Effects of different natural additives on polysaccharides and vitamin C in desugared freeze-dried jujube powder

2.3　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉功能性成分的影响

添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉的总酚含量（TPC）和总黄酮含量（TFC）结果如图 7 所示。可知添加不同天然助剂对样品的 TPC 和 TFC 具有明显的影响，其中 JP-WSL1 的 TPC 和 TFC 最高，分别为 1287.55±2.65 mg GAE/100 g 和 447.26±2.65 mg RE/100 g；JP-WP 的 TPC 和 TFC 最低，分别为 1268.27±2.22 mg GAE/100 g 和 431.21±2.38 mg RE/100 g，均明显高于对照组（P<0.05）。这可能是由于 JP-WSL1 中的天然助剂可通过多元机制发挥作用，天然助剂通过物理包埋作用形成保护屏障，减少冻干过程中酚类/黄酮因高温、氧化或脱水导致的降

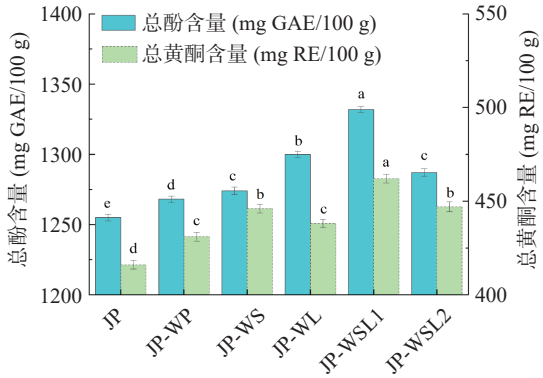


图 7　不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的 TPC 和 TFC 的影响

Fig.7　Effects of different natural additives on the TPC and TFC of dehydrated jujube powder

解；其含有的极性官能团（羟基、羧基）可与酚类/黄酮形成氢键或离子键，增强稳定性，从而提升保留率与提取效率[30]。

2.4 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉抗氧化性质的影响

为了进一步验证这一推测，对样品的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力进行了测定，如图 8 所示，添加不同天然助剂的真空冷冻干燥脱糖枣粉的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力呈现与 TPC 和 TFC 相似的趋势。JP-WSL1 的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力最高，分别为 49.32%±0.18% 和 36.20%±0.35%，而 JP-WP 的最低，分别为 42.68%±0.22% 和 30.10%±0.38%，均显著高于对照组（P<0.05）。这些结果表明，通过添加适当的天然助剂，不仅可以改善真空冷冻干燥脱糖枣粉的物理性质，还可以提高其抗氧化能力，其中 JP-WSL1 作为天然助剂的效果最佳。

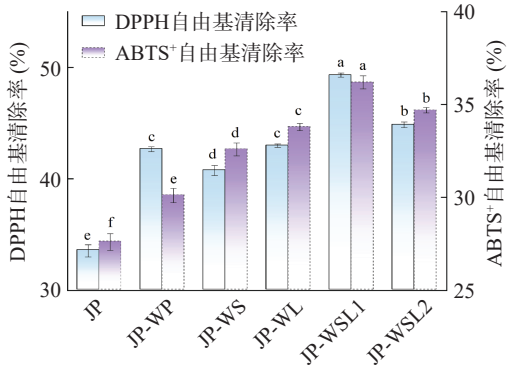


图 8 不同天然助剂对真空冷冻干燥脱糖枣粉的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除能力的影响

Fig.8 Effects of different natural additives on the DPPH and ABTS⁺ radical scavenging capacity of dehydrated jujube powder

2.5 感官评价

对样品进行感官评价有利于了解消费者对产品的可接受程度[31]。图 9 为不同天然助剂真空冷冻干燥脱糖枣粉冲调后的感官评价。经小组成员评定后发现，相较于对照样品 JP 冲调饮料，添加天然助剂样品冲调饮料具有更高的颜色、气味和滋味属性，其中 JP-WSL1 冲调饮料评分最高，颜色、气味、滋味分别为 7.7、7.9、6.8。结合颜色、气味和滋味属性评分，最终得出 JP-WSL1 冲调饮料具有最高的总体可接受度（8.3）。添加乳清蛋白、甜菊糖苷、副干酪乳杆菌天然助剂后，赋予了真空冷冻干燥脱糖枣粉发酵乳香、清新感，平衡枣粉酸涩感且无热量负担，三者协同作用下，既弥补冻干香气损失、掩盖不良风味，又叠加多重正向香气（甜香+乳香+发酵香），使真空冷冻干燥脱糖枣粉气味更丰富、协调且饱满。在口感方面，添加天然助剂的样品也普遍表现出更加细腻、爽滑的口感，这可能与样品颗粒的微观结构和粒径分布有关。综上所述，通过感官评价可知，添加适当的天然助剂均可提高真空冷冻干燥脱糖枣粉的感官品质，其中 JP-WSL1 作为天然助剂的效果最佳。

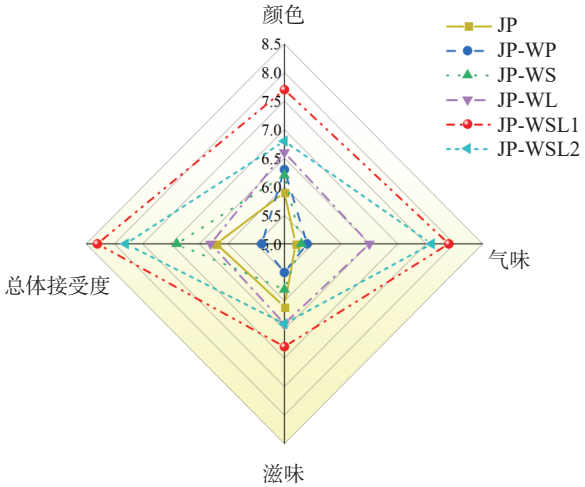


图 9 不同天然助剂真空冷冻干燥脱糖枣粉冲调饮料的感官评价

Fig.9 Sensory evaluation of reconstituted drink made from freeze-dried jujube powder with different natural additives

3 结论

本研究通过复配乳清蛋白、甜菊糖苷和副干酪乳杆菌等天然助剂，制备了真空冷冻干燥脱糖枣粉，并系统分析了其物理性质、功能性成分、抗氧化能力及感官特性。结果表明，天然助剂的添加能够显著优化枣粉的加工性能与营养品质，其中配方 JP-WSL1（枣粉∶乳清蛋白∶甜菊糖苷∶副干酪乳杆菌=7∶1∶1.5∶0.5）的综合表现最佳。该配方不仅具有优异的物理特性（平均粒径 6.25 μm、水分含量 6.67%、接触角 39.51°、溶解度 57.96%），还保留了较高的活性成分含量（总酚 1332 mg GAE/100 g、总黄酮 462 mg RE/100 g）和抗氧化能力（DPPH 自由基清除率 49.32%、ABTS⁺自由基清除率 36.2%），同时感官品质突出。本研究证实，天然助剂的科学复配可有效解决真空冷冻干燥脱糖枣粉在溶解性、稳定性和功能活性方面的技术瓶颈，为果蔬冲调粉的工业化生产提供了理论依据与技术参考。未来可进一步优化助剂配比，探索其在其他果蔬粉加工中的应用潜力，推动真空冷冻干燥技术在健康食品领域的深度开发。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] SANG Y, YANG W, LIU Y, et al. Influences of low temperature on the postharvest quality and antioxidant capacity of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112876.

[2] AAFI E, REZA M, MIRABZADEH M. Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. (Rhamnaceae)): A review on its pharmacological properties and phytochemistry[J]. Tradit Med Res, 2022, 7(4): 38.

[3] RUAN J, HAN Y, KENNEDY J F, et al. A review on polysaccharides from jujube and their pharmacological activities[J]. Carbo-

hydrate Polymer Technologies Applications, 2022, 3: 100220.
[4] ZHU J P, LU Y H, HE Q. Recent advances on bioactive compounds, health benefits, and potential applications of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.): A perspective of by-products valorization [J]. Trends in Food Science Technology, 2024, 145: 104368.
[5] LIAO Y, LIU Y, ZHANG W, et al. Effects of variable-temperature drying on the qualities and sweet-substance profile of *Ziziphus jujuba* Mill. cv. Junzao[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101361.
[6] CAI W T, ZHUANG H N, WANG X Y, et al. Functional nutrients and jujube-based processed products in *Ziziphus jujuba*[J]. Molecules, 2024, 29(14): 3437.
[7] 夏晓霞, 薛艾莲, 寇福兵, 等. 冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 29−38. [XIA X X, XUE A L, KOU F B, et al. Color, thermodynamic properties and sugar substance basis analysis of moisture absorption of jujube powder[J]. Food Science, 2022, 43(11): 29−38.]
[8] 刘战霞, 代文婷, 吴洪斌, 等. 超声辅助去糖处理对热风干燥及压差闪蒸干燥红枣脆片品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 234−241. [LIU Z X, DAI W T, WU H B, et al. Effect of ultrasound-assisted desugarization treatment on the quality of hot air drying and differential pressure flash drying of red jujube crisps[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 234−241.]
[9] XIAO Z, HUANG X, LIU Z, et al. Effects of Lactobacillus plantarum-fermented soy whey composite/huajiao seed antimicrobial peptides/inulin composites on konjac gel preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 46: 101346.
[10] SHEN Y, MIAO C, MA M, et al. Mechanistic insights into the changes of biological activity and physicochemical characteristics in *Lacticaseibacillus paracasei* fortified milk powder during storage[J]. Food Chemistry, 2024, 452: 139501.
[11] 郑先哲, 鲁天麟, 陈启明, 等. 复合助剂对低温喷雾干燥蓝靛果粉理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 93−106. [ZHENG X Z, LU T L, CHEN Q M, et al. Effects of compound additives on the physicochemical properties of low-temperature spray-dried indigo powder[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 93−106.]
[12] 杨忻瑞, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 无定形态小分子糖对枣粉水分吸附及玻璃化转变的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 65−76. [YANG X R, BI J F, CHEN Q Q, et al. Effects of amorphous small molecular sugars on moisture adsorption and glass transition of jujube powder[J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(11): 65−76.]
[13] ADDO K A, BI J, CHEN Q, et al. Understanding the caking behavior of amorphous jujube powder by powder rheometer[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 483−490.
[14] QADRI T, NAIK H R, HUSSAIN S Z, et al. Spray dried apple powder: Qualitative, rheological, structural characterization and its sorption isotherm[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113694.
[15] XIA X, LI F, RAN H, et al. Effect of jujube kernel powder addition on moisture absorption performance, color stability, texture properties and agglomeration characteristics of jujube powder[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 174: 114452.
[16] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转换点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 110−120. [MA Y C, BI J F, YI J Y, et al. Effects of predrying mode and moisture transition point on the quality of vacuum freeze-dried apple crisps[J]. Chinese Journal of Food, 2021, 21(9): 110−120.]
[17] SHAO Z, HAN J, WANG J, et al. Process optimization, digestibility and antioxidant activity of extruded rice with *Agaricus bisporus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112350.
[18] 王勋, 蔡勇建, 邓欣伦, 等. 大豆纤维对真空冷冻干燥芒果粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 117-124. [WANG X, CAI Y J, DENG X L, et al. Effect of soybean fiber on the quality of vacuum freeze-dried mango powder[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(13): 117-124.]
[19] 冉欢, 夏晓霞, 雷小娟, 等. 双酶协同酶解处理对冬枣粉理化特性及结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 240−246. [RAN H, XIA X X, LEI X J, et al. Effects of dual-enzyme synergistic enzymatic treatment on physicochemical properties and structural characteristics of jujube powder[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(11): 240−246.]
[20] QIN W, TANG S, CHEN C, et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil Pickering emulsion stabilized by zein/carboxylated cellulose nanocrystals composite nanoparticles [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109321.
[21] ARSLAN-TONTUL S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 119: 108859.
[22] WOJDYŁO A, LECH K, NOWICKA P, et al. Influence of different drying techniques on phenolic compounds, antioxidant capacity and colour of *Ziziphus jujube* Mill. fruits[J]. Molecules, 2019, 24(13): 2361.
[23] SUN X, HU J, XIAO H, et al. Effect of pectin addition on the drying characteristics of freeze-dried restructured strawberry blocks [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115716.
[24] ZHANG X, WANG Y, NIAN R, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on drying characteristics and water migration characteristics of freeze-dried strawberry[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139287.
[25] XU H, WU M, WANG B, et al. Changes in water status and microstructure reveal the mechanisms by which tempering affects drying characteristics and quality attributes of medicinal chrysanthemums[J]. Industrial Crops Products, 2023, 205: 117463.
[26] GONG Q, LIU C, TIAN Y, et al. Effect of cavitation jet technology on instant solubility characteristics of soymilk flour: Based on the change of protein conformation in soymilk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106421.
[27] HOU H, CHEN Q, BI J, et al. Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 272: 109874.
[28] HOU H, CHEN Q, BI J, et al. Glass transition and crystallization of solid model system of jujube slice as influenced by sugars and organic acids[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129935.
[29] CHEN Q, BI Y, BI J, et al. Glass transition and state diagram for jujube powders with and without maltodextrin addition[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(9): 1606−1614.
[30] MAO J, SUN H, CAO L, et al. Comparative analysis of the quality characteristics of high-moisture jujube with different degrees of dehydration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 198: 116026.
[31] LIU D, SHEN Q, LIN K, et al. The aroma profiles of dried gonggans: Characterization of volatile compounds in oven-dried and freeze-dried gonggan[J]. Food Research International, 2024, 191: 114716.

客座主编



徐贞贞，中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所果蔬功能与健康创新团队首席。中国农业大学兼职教授、博士生导师。曾获中国农业大学博士学位，先后在美国俄亥俄州立大学、国际原子能机构（IAEA）等国外高校与国际机构交流学习。国家自然科学基金青年 B 类项目获得者，先后入选中国农业科学院“农科英才”杰出青年英才、新疆“天池英才”特聘专家等。兼任全国食品工业标委会、全国食品质量控制与管理标委会、农业农村部农产品加工标委会等 4 个国家/行业标委会委员，中国食品科学技术学会果蔬加工技术分会秘书长、中国农学会食物与营养专委会常务委员，中轻食品工业管理中心技术专家委委员，*Food Innovation and Advances* 执行主编、《食品工业科技》编委等。近五年，以通讯作者发表 SCI/EI 论文 40 篇，第一发明人获授权 7 件（美国专利 1 件），牵头制/修订行标 8 项，首次将果蔬基料定义写入标准，制定食品非热加工领域首个超高压食品国标外文版，以第一、二完成人获省部级科学研究类成果一等奖 2 项、行业一等奖 1 项。

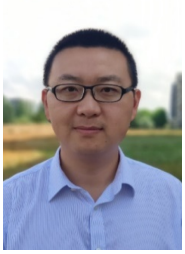


王永涛，中国农业大学食品科学与营养工程学院教授，博士生导师；农业农村部果蔬加工重点实验室副主任。入选农业农村部神农青年英才、中国农业大学“人才培育发展支持计划（青年新星 A 类）”等。兼任中国食品科学技术学会非热加工技术分会秘书长、国家农产品加工技术研发体系青年委员会委员、北京食品学会会员；《食品工业科技》编委、*Frontiers in Nutrition*、*Molecules* 等客座编辑。研究方向为果蔬加工，重点为果蔬非热加工领域的基础理论和关键加工技术研究。近年来，主持国家自然科学基金面上和青年项目、国家重点研发计划课题和子课题、国家科技支撑计划课题及北京市科技计划课题等 10 余项；发表 SCI/EI 论文 60 余篇，授权发明专利 10 件，参编著作 3 部（中文 2 部，英文 1 部）、教材 1 部，牵头或参与制定国标 1 项、行标 6 项，获省部级科研成果奖 4 项、社会力量科研成果奖 3 项，北京市教学成果奖 1 项、校级教学成果奖 2 项。



李涛，湖南省农业科学院农产品加工与质量安全研究所副研究员，硕士生导师，日本鹿儿岛大学联合培养博士，科技部“果蔬加工与质量安全”和农业农村部“农产品加工与质量安全”创新团队科研骨干成员，湖南省食品科学技术学会理事。主要从事果蔬营养成分的功能挖掘及机制研究。近五年先后主持和参与“十四五”国家重点研发计划、国家区域创新发展联合基金、中国工程院战略研究与咨询项目、湖南省重点研发计划、湖南省自然科学基金、企业横向开发项目等共 22 项。在本领域国内外主流学术期刊上发表论文 30 余篇，授权国家发明专利 2 件，制定标准 3 项，参与编写专著 1 本，获湖南省自然科学二等奖 1 项。

产业顾问



李仁杰，领航集团研发中心基础研究部，部门负责人。食品科学博士，毕业于中国农业大学。曾先后在丹麦嘉士伯集团和哥本哈根大学从事博士后研究，在 Arla Foods 食品公司担任产品设计工作。在 *Food Hydrocolloids* 和 *Food Chemistry* 等期刊发表论文若干篇。主持广东省重点领域研发项目 1 项。在果蔬加工理论研究、非热杀菌技术应用研究、酶技术应用研究和蛋白质技术应用研究方面具有一定的经验。目前在领航集团负责果蔬基料制造相关研发与科研管理工作。