

## 不同物理场处理技术对冻干芒果粉品质的影响

林可为, 李梓健, 李林静, 王 锋, 马路凯, 肖更生

## Effects of Different Physical Field Treatment Technologies on the Quality of Freeze-dried Mango Powder

LIN Kewei, LI Zijian, LI Linjing, WANG Feng, MA Lukai, and XIAO Gengsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060133>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 渗透方式对真空冷冻干燥芒果细胞结构及品质的影响

Effect of Osmotic Method on Cell Structure and Quality of Vacuum Freeze-dried Mango

食品工业科技. 2022, 43(8): 50-57 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070226>

#### 电子束辐照对芒果品质的影响

Effect of Electron Beam Irradiation on Mango Quality

食品工业科技. 2021, 42(2): 279-283,289 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030073>

#### 低温等离子体冷杀菌对盐水鸭货架期及风味品质的影响

Effects of Cold Plasma Sterilization on Shelf Life and Flavor Quality of Salted Duck

食品工业科技. 2021, 42(17): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010031>

#### 高压电场低温等离子体对红枣干果的冷杀菌工艺优化及其对品质的影响

Optimization of Cold Sterilization Process and Its Effect on Quality of Dried Jujube by High Voltage Electric Field Cold Plasma

食品工业科技. 2021, 42(16): 317-324 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120235>

#### 冷等离子体对谷物品质影响的研究进展

Research Progress on Effects of Cold Plasma on Cereal Quality

食品工业科技. 2025, 46(6): 427-437 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040284>

#### 低温等离子体对糙米蒸煮品质和物化特性的影响

Effects of Low Temperature Plasma on Cooking Quality and Physicochemical Properties of Brown Rice

食品工业科技. 2020, 41(2): 9-15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

林可为, 李梓健, 李林静, 等. 不同物理场处理技术对冻干芒果粉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 41–49. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060133

LIN Kewei, LI Zijian, LI Linjing, et al. Effects of Different Physical Field Treatment Technologies on the Quality of Freeze-dried Mango Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 41–49. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060133

· 研究与探讨 ·

# 不同物理场处理技术对冻干芒果粉品质的影响

林可为<sup>1</sup>, 李梓健<sup>1</sup>, 李林静<sup>1</sup>, 王 锋<sup>1</sup>, 马路凯<sup>1</sup>, 肖更生<sup>1,2,\*</sup>

(1.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225;  
2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村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:** 为探究非热物理场处理技术对冷冻干燥芒果粉品质的影响, 以未处理冷冻干燥芒果粉为对照组 (CK), 将不同功率微波处理 (100、300 和 500 W), 不同剂量辐照处理 (2、4 和 8 kGy) 和不同电压低温等离子体处理 (20、30 和 40 kV) 作为试验组, 通过对色泽、水分活度、溶解度等物理指标和总酚、维生素 C 含量和抗氧化活性等化学指标的测定, 分析冻干芒果粉的品质变化, 并确定各处理组中最优的处理参数。结果表明, 物理场处理较好保持了芒果粉的色泽, 显著降低了水分活度 ( $P<0.05$ ), 但对吸湿性无显著影响, 溶解度较对照组显著提高了 18%~63% ( $P<0.05$ )。傅里叶红外光谱结果显示, 物理场处理对其化学结构无明显影响; 物理场处理显著降低了芒果粉的可溶性糖和可溶性膳食纤维含量 ( $P<0.05$ ), 而显著提高了总酚含量 (3%~14%)、维生素 C 含量 (3%~34%) 和抗氧化活性 (5%~25%) ( $P<0.05$ ), 但较高能量的辐照和低温等离子体体会导致维生素 C 降解。综合各指标分析结果得出 100 W 微波处理, 2 kGy 辐照处理和 30 kV 低温等离子体处理为各组中最佳处理条件。因此, 物理场处理技术能有效改善冷冻干燥芒果粉的品质, 且在适宜的参数下可最大限度提高储藏稳定性和营养特性。

**关键词:** 微波, 辐照, 低温等离子体, 冻干芒果粉, 品质

中图分类号: TS255.42

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)12-0041-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060133

本文网刊:



## Effects of Different Physical Field Treatment Technologies on the Quality of Freeze-dried Mango Powder

LIN Kewei<sup>1</sup>, LI Zijian<sup>1</sup>, LI Linjing<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, MA Lukai<sup>1</sup>, XIAO Gengsheng<sup>1,2,\*</sup>

(1. Lingnan Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Characteristic Food, Village Department of Key Laboratory of Science and Technology of Lingnan Characteristic Food of Guangdong Province, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225, China;  
2. Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** To investigate the effects of non-thermal physical field treatment techniques on the quality of freeze-dried mango powder, untreated freeze-dried mango powder was used as a control group (CK). The experimental groups were subjected to different microwave powers (100, 300, and 500 W), various irradiation doses (2, 4, and 8 kGy), and different voltage

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向揭榜挂帅项目 (2024KJ15); 广东省科学技术协会青年科技人才培养计划 (SKXRC202401)。

作者简介: 林可为 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1027091992@qq.com。

\* 通信作者: 肖更生 (1965-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: Gshxiao@aliyun.com。

levels of cold plasma (20, 30, and 40 kV). By measuring physical indicators such as color, water activity, and solubility, along with chemical indicators including total phenols, vitamin C content, and antioxidant activity, the quality changes of freeze-dried mango powder were analyzed, and the optimal treatment parameters for each group were determined. The results showed that the color of the mango powder was better maintained by physical field treatments, water activity was significantly reduced ( $P<0.05$ ), but no significant effect was observed on hygroscopicity, and solubility was increased by 18%~63% ( $P<0.05$ ) compared to the control group. Fourier transform infrared spectroscopy indicated that no significant impact on the chemical structure was observed. Soluble sugar and dietary fiber content were significantly reduced by physical field treatments ( $P<0.05$ ), while total phenols (3%~14%), vitamin C content (3%~34%), and antioxidant activity (5%~25%) were notably increased ( $P<0.05$ ). However, high-energy irradiation and cold plasma caused vitamin C degradation. Comprehensive analysis concluded that the optimal conditions were 100 W microwave treatment, 2 kGy irradiation, and 30 kV cold plasma treatment. Thus, physical field treatment techniques can effectively improve the quality of freeze-dried mango powder and maximize storage stability and nutritional characteristics when appropriate parameters are used.

**Key words:** microwave; irradiation; cold plasma; freeze-dried mango powder; quality

芒果(*Mangifera indica* L.)属于漆树科芒果属植物,是岭南特色佳果之一,因富含多种营养物质,被誉为“热带水果之王”,但芒果为呼吸跃变型水果,采后代谢旺盛,果实容易后熟,在低温条件下贮藏极易遭受冷害<sup>[1]</sup>,导致储运过程中损失较大,对其进行精深加工是一种有效的解决方法。目前我国对芒果的加工生产主要集中于芒果粉的制作,然而单一的干燥加工方式易造成果粉营养物质流失、风味下降,同时还存在吸湿性强导致储藏期短等问题,严重影响了高品质芒果粉的发展。

物理场处理技术是提高果粉品质的关键工艺。目前,应用于水果干燥加工的处理技术有烫漂<sup>[2]</sup>、欧姆加热<sup>[3]</sup>、超声波<sup>[4]</sup>、微波<sup>[5]</sup>、辐照<sup>[6]</sup>和低温等离子体<sup>[7]</sup>等,尽管烫漂和欧姆加热技术可有效提高果粉储藏稳定性,但高温处理会导致水果热敏性物质损失,外观颜色劣变等问题;而微波、辐照和低温等离子体作为新兴的非热物理场处理技术,能够更好地保持水果原有品质并提高其储藏稳定性。微波通过非热效应可强化能量传递过程,使生物活性化合物更多地释放。<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照能够穿透物质并与物质中的原子和分子相互作用,从而改善样品品质。低温等离子体通过蚀刻作用可改变样品表面结构,破坏生物活性化合物和植物细胞膜之间的共价键,有利于营养物质的释放。Salehi 等<sup>[5]</sup>研究发现微波处理显著提高樱桃干的总酚含量和质构特性。Darfour 等<sup>[8]</sup>研究发现 5 kGy 辐照处理可提高可乐果粉微生物稳定性和抗氧化活性。Khoshkalam 等<sup>[9]</sup>研究发现冷等离子体可降低香蕉片的多酚氧化酶和过氧化物酶,提高了其生物活性物质含量以及抗氧化能力。

本研究基于微波、辐照和低温等离子体这三种物理场的作用机理,以提高冷冻干燥芒果粉的营养品质为目标,分别采用三种处理参数对冻干芒果进行处理,并筛选出最优处理参数,获得最佳处理工艺,以期高品质果粉加工提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜芒果 广州市南沙区,品种名为“越南红

芒”;化学试剂 均为分析纯,阿拉丁化学科技有限公司。

CR-10 Plus 色差仪 日本 Konica Minolta 公司;Hygrolabta 台式水分活度仪 瑞士 Rotronic 公司;Synergy H1 多功能酶标仪 安捷伦科技(中国)有限公司;JP008 超声清洗机 深圳洁盟技术股份有限公司;SCIENTZ-18N 冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司;800Y 多功能高速粉碎机 上海哈顿食品有限公司;IRAffinity-1S 傅里叶红外光度计 日本岛津公司;差示扫描量热仪 瑞士 Mettler Toledo 公司;XO-SM50 超声波微波协同反应工作站 南京先欧仪器制造有限公司;Q(H) <sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照装置 广州辐锐高能技术有限公司;DBD-ACP 低温等离子体反应装置 美国 Phenix Technologies 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 芒果冷冻干燥 挑选无机械损坏、无病虫害的芒果样品洗净后去皮去核,置于冰箱预冻 24 h,使用真空冷冻干燥设备进行干燥。冷阱温度-60 ℃,真空度 10 Pa,干燥 48 h。

1.2.2 冻干芒果物理场处理 微波处理:将冻干芒果分为 3 组,分别采用 100、300 和 500 W 微波处理 10 min,温度保持在 25 ℃,处理后分别将样品记为 MW1、MW2 和 MW3。

辐照处理:将冻干芒果分为 3 组,分别采用 2、4 和 8 kGy 剂量进行辐照处理,处理后分别将样品记为 IR1、IR2 和 IR3。

低温等离子体处理:将冻干芒果分为 3 组,分别采用 20、30 和 40 kV 处理 1 min,处理后分别将样品记为 LTP1、LTP2 和 LTP3。

1.2.3 芒果粉样品制备 将未处理组(CK)和物理场处理的冻干芒果使用高速多功能粉碎机进行粉碎,每组样品打粉 3 次,每次粉碎时间 10 s,间隔 30 s,过 80 目筛,制得芒果粉。将芒果粉保存在-80 ℃下以供进一步分析。

1.2.4 色泽测定 使用色差仪测定芒果粉色差值。



以未处理组为对照计算  $\Delta E$ , 采用式(1)计算:

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

式中:  $\Delta E$  为物理场处理后芒果粉的色差值;  $L_0$ 、 $L^*$  为处理前后芒果粉的亮度;  $a_0$ 、 $a^*$  为处理前后芒果粉的红绿值;  $b_0$ 、 $b^*$  为处理前后芒果粉的黄蓝值。

1.2.5 水分活度测定 水分活度参考 Hygrolab 水分活度仪说明书测定。

1.2.6 玻璃化转变温度测定 参考许文静等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。使用 DSC 测定芒果粉玻璃化转变温度, 称取 5 mg 芒果粉于坩埚中, 以空坩埚为对照, 起始温度  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温速率由  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  增加至  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 并充氮气保护。

1.2.7 吸湿性测定 参考赵静等<sup>[11]</sup>的方法并略作修改。精确称取 1 g 芒果粉置于干燥皿中, 将干燥皿放置于盛有饱和氯化钠溶液的干燥器中, 保存 7 d 后称重, 采用式(2)计算:

$$\text{吸湿性}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $m_1$  为样品吸湿前的质量, g;  $m_2$  为样品吸湿后的质量, g。

1.2.8 溶解度测定 参考赵静等<sup>[11]</sup>的方法并略作修改。精确称取 1 g 芒果粉样品于烧杯中, 加入 50 mL 蒸馏水, 使用磁力搅拌器高速搅拌 5 min, 随后使用离心机以 4000 r/min 离心 5 min, 取上清液 25 mL 于  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱中干燥至恒重, 采用式(3)计算:

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $m_1$  为称取的样品质量, g;  $m_2$  为干燥至恒重的样品质量, g。

1.2.9 傅里叶红外光谱测定 参考许文静等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。称取 1 mg 芒果粉样品和 1 g 溴化钾置于玻璃研钵中混匀并研磨, 压片后使用傅里叶红外光谱仪进行测定, 波数范围为  $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ , 分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ 。

1.2.10 可溶性糖含量测定 参考 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》, 取 5 mL 芒果粉提取液于离心管中, 加入 1 mL 盐酸溶液(6 mol/L), 置  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴锅中加热 10 min, 取出后冷却至室温, 加入甲基红指示剂, 用氢氧化钠溶液(6 mol/L)中和至浅橙色, 用水定容至 100 mL, 用酶标仪于 540 nm 处测定吸光值。以葡萄糖标准溶液制作标曲, 得到可溶性糖含量的标准曲线:  $y=4.275x-0.07$ ,  $R^2=0.9991$ ; 式中:  $x$ : 葡萄糖溶液质量浓度, mg/mL;  $y$ : 540 nm 处吸光值。

1.2.11 可溶性膳食纤维含量测定 参考 GB 5009.88-2023《食品中膳食纤维的测定》。精确称取 1 g 芒果粉, 按照 1:10 g/mL 的料液比将样品和蒸馏水置于离心管中, 混匀后调节 pH 至 4.5, 然后在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的

条件下加入 12% 纤维素酶反应 2 h, 反应结束后保温 30 min, 以 3500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 加入 4 倍体积的 95% 乙醇静置过夜, 于 3500 r/min 的条件下离心 15 min, 收集沉淀物并烘干称重, 沉淀物干燥后的重量即为芒果粉可溶性膳食纤维含量(g/100 g)。

1.2.12 总酚含量测定 参考许文静等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。取 0.5 mL 芒果粉提取液和 0.5  $\mu\text{L}$  福林酚试剂于离心管中, 反应 5 min 后加入 1.5 mL 的 0.70 mol/L 碳酸钠, 室温条件下避光反应 1 h, 用酶标仪于 765 nm 处测定吸光值。以没食子酸为标准品, 配制没食子酸标准溶液并制作标曲, 得到总酚含量的标准曲线:  $y=2.808x+0.0012$ ,  $R^2=0.9994$ ; 式中:  $x$ : 没食子酸溶液质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $y$ : 765 nm 处吸光值。

1.2.13 维生素 C 含量测定 参考文献[4]的方法并略作修改, 取芒果粉提取液 0.5 mL, 与 5 mL 反应混合液混合于离心管中, 置于  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴中加热 60 min, 用酶标仪于 534 nm 处测定吸光值。以维生素 C 标准溶液制作标准曲线, 得到标准曲线线性回归方程:  $y=0.0044x-0.018$ ,  $R^2=0.9978$ , 式中:  $x$ : 维生素 C 标准溶液质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ;  $y$ : 534 nm 处吸光值。

1.2.14 DPPH 自由基清除能力测定 参考许文静等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。取 50  $\mu\text{L}$  芒果粉提取液, 加入 1  $\mu\text{L}$ 、0.1 mmol/L DPPH 乙醇溶液, 避光反应 30 min, 于 517 nm 处用酶标仪测定其吸光值。

1.2.15 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力测定 参考许文静等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改。取 50  $\mu\text{L}$  芒果粉提取液, 加入 1 mL ABTS 储备液, 避光反应 20 min, 于 730 nm 处用酶标仪测定其吸光值。

### 1.3 数据处理

本实验所有指标测定均重复 3 次, 结果以平均值 $\pm$ 标准差表示; 采用 SPSS 22.0 软件对数据进行分析处理, 采用 OriginPro 2021 软件进行绘图。数据采用单因素方差分析(ANOVA)进行显著性检验, 显著性水平设定为  $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同物理场处理对芒果粉色泽的影响

干燥产品的颜色和外观是影响消费者选择的重要因素。不同物理场处理对芒果粉色泽的影响如图 1 所示。微波处理显著提高了芒果粉的亮度( $L^*$ 值), 并使其呈现更加鲜艳的红、黄色( $a^*$ 和  $b^*$ 值增加), 这可能是由于微波处理引起芒果粉的细胞变形和细胞膜破裂, 导致内部散射光和表面反射发生变化<sup>[4]</sup>。辐照处理对  $L^*$ 值影响较小, 但显著增加了  $a^*$ 和  $b^*$ 值, 可能是由于辐照能量改变了样品结构和纹理。低温等离子体处理在不同电压下对芒果粉色泽影响各异, 可能与处理电压对样品分子结构和表面特性的作用强度有关。物理场处理通过改变芒果粉的结构和表面特性, 影响了其颜色特征, 并且这些变化

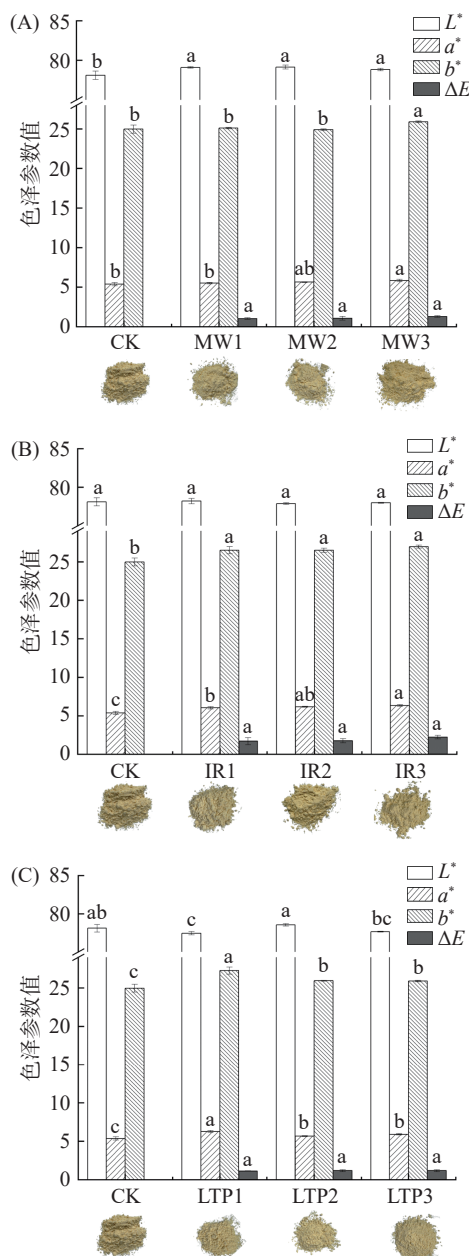


图1 不同物理场处理的芒果粉颜色和外观

Fig.1 Colors and appearances of mango powder under different physical field treatments

注: (A)微波组; (B)辐照组; (C)低温等离子体组; 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 图3~图4同。

可提高对消费者的吸引力。

## 2.2 不同物理场处理对芒果粉水分活度及玻璃化转变温度的影响

水分活度是衡量食品稳定性和安全性的重要指标,如表1所示,与对照组相比,三种物理场处理均显著降低了芒果粉的水分活度( $P<0.05$ )。微波处理可能通过增加芒果粉中亲水基团与水分子之间的氢键作用,导致结合水所受束缚力不断增强,从而使水分活度降低<sup>[12]</sup>。由于辐照能量可穿透芒果粉样品,可能使其孔径和细胞完整性发生变化,导致水分活度降低<sup>[6]</sup>。低温等离子体处理可引起粉体结构变化,增强水分子与固体之间的相互作用<sup>[13]</sup>,进一步降低了水分活度。因此,物理场处理可显著降低芒果粉的水分活度,使其更有利于储藏。

芒果粉的玻璃化转变起始(Tgi)、中点(Tgm)和终点(Tge)温度如表1所示,其中Tgi为样品玻璃化转变温度。食品的玻璃化转变温度与水分密切相关,由于水分对非晶态基质的塑化作用<sup>[14]</sup>,Tgi值会随着水分活度的减少而增加,因此物理场处理后芒果粉的Tgi显著高于对照组( $P<0.05$ )。此外,研究表明,微波和辐照处理均可引起样品分子内部或分子之间的交联反应,减少分子链的运动性,提高分子稳定性,从而显著提高玻璃化转变温度<sup>[15-16]</sup>。低温等离子体处理可能通过蚀刻作用改变样品分子结构,从而使玻璃化转变温度升高,改善其热稳定性<sup>[17]</sup>。

## 2.3 不同物理场处理对芒果粉粉质特性的影响

吸湿性是样品从环境中吸收水分的能力,粉末样品吸湿后其内聚力会增加,流动性降低<sup>[11]</sup>。如表2所示,与对照组相比,不同物理场处理均降低了芒果粉的吸湿性。微波处理增加了芒果粉的孔隙率和渗透性,导致亲水基团减少,从而降低其吸湿性<sup>[18]</sup>。辐射处理可能改变了芒果粉的细胞完整性和孔径,影响了其从空气中吸收水分的能力<sup>[19]</sup>。低温等离子体处理降低了芒果粉表面自由能,影响了与其环境水分的相互作用,导致吸湿性下降<sup>[20]</sup>,但LTP2和LTP3的吸湿性相同,表明当处理电压大于30 kV时,对吸湿性影响较小。

表1 不同物理场处理对芒果粉水分活度及玻璃化转变温度的影响

Table 1 Effects of different physical field treatments on water activity and glass transition temperature of mango powder

处理方式	样品	水分活度	Tgi(℃)	Tgm(℃)	Tge(℃)
未处理	CK	0.264±0.002 <sup>Aaa</sup>	-5.09±0.17 <sup>Ddd</sup>	-0.68±0.15 <sup>Ddd</sup>	1.23±0.15 <sup>Ddd</sup>
	MW1	0.248±0.002 <sup>B</sup>	0.13±0.20 <sup>C</sup>	3.74±0.16 <sup>C</sup>	9.17±0.17 <sup>C</sup>
微波	MW2	0.232±0.002 <sup>D</sup>	2.78±0.11 <sup>A</sup>	7.04±0.13 <sup>A</sup>	11.5±0.14 <sup>A</sup>
	MW3	0.238±0.002 <sup>C</sup>	1.7±0.13 <sup>B</sup>	4.36±0.20 <sup>B</sup>	9.52±0.15 <sup>B</sup>
辐照	IR1	0.253±0.002 <sup>b</sup>	-1.48±0.12 <sup>c</sup>	-0.14±0.10 <sup>c</sup>	6.78±0.18 <sup>c</sup>
	IR2	0.238±0.002 <sup>d</sup>	1.55±0.22 <sup>a</sup>	5.74±0.19 <sup>a</sup>	10.25±0.31 <sup>a</sup>
	IR3	0.249±0.001 <sup>c</sup>	0.75±0.14 <sup>b</sup>	5.12±0.3 <sup>b</sup>	10.16±0.12 <sup>b</sup>
低温等离子体	LTP1	0.247±0.002 <sup>β</sup>	-0.16±0.10 <sup>γ</sup>	4.68±0.14 <sup>γ</sup>	9.55±0.19 <sup>γ</sup>
	LTP2	0.237±0.002 <sup>γ</sup>	1.28±0.13 <sup>β</sup>	5.57±0.15 <sup>β</sup>	10.89±0.24 <sup>β</sup>
	LTP3	0.236±0.002 <sup>γ</sup>	1.56±0.15 <sup>a</sup>	5.66±0.17 <sup>a</sup>	11.59±0.14 <sup>a</sup>

注: 表中同列不同大写字母、小写字母和拉丁文分别表示未处理组与微波组、辐照组和低温等离子体组的统计学显著性差异( $P<0.05$ ), 表2~表3同。

表 2 不同物理场处理对芒果粉吸湿性和溶解度的影响			
Table 2 Effects of different physical field treatments on the hygroscopicity and solubility of mango powder			
处理方式	样品	吸湿性(%)	溶解度(%)
未处理	CK	29.0±1.0 <sup>Aa</sup>	12.49±0.32 <sup>Dc</sup>
	MW1	28.1±0.5 <sup>A</sup>	20.37±0.13 <sup>A</sup>
微波	MW2	28.7±0.7 <sup>A</sup>	19.36±0.35 <sup>B</sup>
	MW3	28.9±0.3 <sup>A</sup>	17.13±0.24 <sup>C</sup>
辐照	IR1	27.2±0.4 <sup>a</sup>	19.97±0.26 <sup>a</sup>
	IR2	27.6±0.5 <sup>a</sup>	19.91±0.27 <sup>a</sup>
	IR3	27.6±0.7 <sup>a</sup>	14.74±0.21 <sup>b</sup>
	LTP1	27.6±0.6 <sup>a</sup>	14.87±0.32 <sup>c</sup>
低温等离子体	LTP2	27.4±0.3 <sup>a</sup>	19.91±0.20 <sup>a</sup>
	LTP3	27.4±0.5 <sup>a</sup>	17.34±0.43 <sup>b</sup>

溶解度是衡量粉末样品在水溶液中性质的重要指标。由表 2 可知,与对照组相比,不同物理场处理均使芒果粉溶解度显著提高( $P<0.05$ )。微波处理增加了芒果粉的颗粒损伤,从而提高了粉体的溶解度;此外,样品中的可溶性物质也会影响溶解度,随着微波功率的升高,溶解度降低,表明较低的微波功率(100 W)可更好地保持样品中的可溶性物质,这与 Li 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。辐照处理改变了芒果粉的内部和表面结构,使其溶解度增加<sup>[22]</sup>,然而在 8 kGy 时溶解度显著降低,表明高剂量辐照对溶解度影响较大。低温等离子体的蚀刻作用可导致芒果粉样品结构破坏、聚合度降低、氢键力和结晶度减弱,从而增加其溶解度<sup>[23]</sup>。因此,不同物理场处理可改变芒果粉的结构和表面特性,降低其吸湿性并提高其溶解度,改善粉质特性。

2.4 不同物理场处理对芒果粉傅里叶红外光谱 (FTIR) 测定结果的影响

傅里叶红外光谱提供了芒果粉样品中主要化学成分的信息,样品的晶型、链构象、螺旋结构的变化都会影响红外光吸收<sup>[21]</sup>。图 2 显示了不同组别芒果粉的 FTIR 光谱,不同处理样品的 FTIR 光谱与对照组基本相似,在 3400、1594、1350、1059  $\text{cm}^{-1}$  处均显示出相同的特征峰,说明物理场处理对芒果粉中化学成分组成影响较小。3400  $\text{cm}^{-1}$  为不饱和碳 C-H 伸缩振动吸收,1594  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰与 C=C 骨架振动相关,此吸收峰为芳香化合物重要特征;1350  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰与 C-N 基团伸缩振动相关,1059  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰与酯基上的 C-O 伸缩振动相关,该吸收峰表示样品中多糖和糖苷等碳水化合物的含量<sup>[24]</sup>。在波长 3400  $\text{cm}^{-1}$  和 1594  $\text{cm}^{-1}$  处,MW1、IR1 和 LTP2 的吸收峰增强,这是由于物理场处理导致键断裂,从而使得 C-H 基团和 C=C 基团吸光度增加。综上所述,三种物理场处理的芒果粉中均没有产生新的吸收峰,也没有特征吸收峰的损失,表明这三种物理场处理对芒果粉样品傅里叶红外光谱无明显影响,先前的研究也获得相似的结果<sup>[25]</sup>。

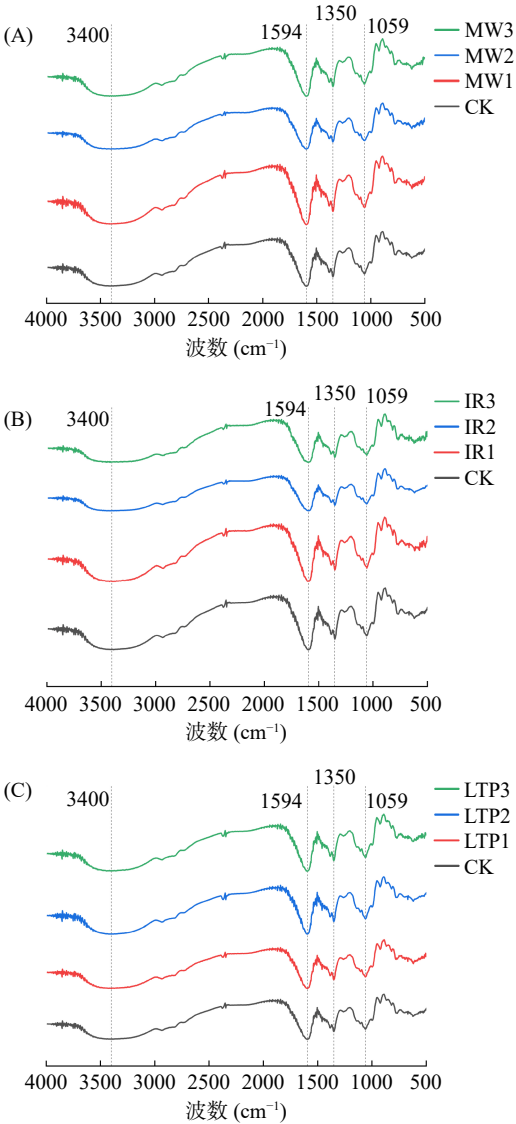


图 2 不同物理场处理对芒果粉红外光谱的影响  
Fig.2 Effects of different physical field treatments on the infrared spectra of mango powder  
注: (A)微波组; (B)辐照组; (C)低温等离子体组。

2.5 不同物理场处理对芒果粉可溶性糖的影响

甜度是水果品质和消费者接受度的主要评价指标之一,由可溶性糖含量决定<sup>[26]</sup>。芒果中的可溶性糖主要由蔗糖、果糖、葡萄糖组成<sup>[27]</sup>。不同物理场处理的芒果粉可溶性糖含量如图 3 所示。与对照组相比,微波处理降低了芒果粉中可溶性糖的含量,这可能是由于微波的非热效应使可溶性糖高速振荡,导致其发生不同程度的降解<sup>[28]</sup>。2 kGy 辐照处理有利于提高可溶性糖含量,但较高剂量会显著减少其含量,这是因为较高剂量的电离辐射会导致糖苷键断裂,进而引起可溶性糖降解<sup>[8]</sup>。低温等离子体处理在 30 kV 时,可溶性糖含量达到最高,但更高处理的电压则会使蔗糖的转化酶活性受到抑制,阻碍蔗糖降解,导致葡萄糖和果糖的生成量减少,从而降低可溶性糖含量<sup>[29]</sup>。因此,物理场处理条件的控制对于芒果粉理化品质的保持具有关键作用,选择合适的工艺参数可以



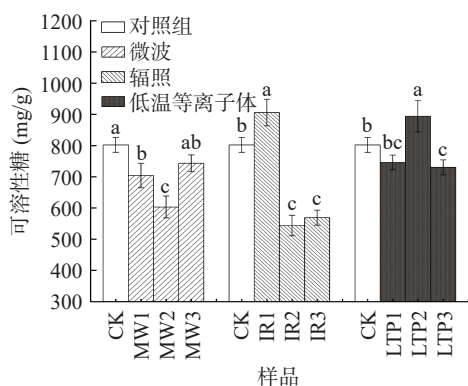


图3 不同物理场处理对芒果粉可溶性糖的影响

Fig.3 Effects of different physical field treatments on the soluble sugar content of mango powder

有效保持和提高芒果粉中的可溶性糖含量,从而优化其甜度和品质。

## 2.6 不同物理场处理对芒果粉可溶性膳食纤维的影响

图4显示了不同物理场处理对芒果粉可溶性膳食纤维含量的影响。与对照组相比,三种物理场处理均显著降低了芒果粉可溶性膳食纤维含量。微波处理可能破坏了可溶性膳食纤维的结构,导致其降解,从而使含量降低<sup>[30]</sup>。由于辐照可使糖苷键水解,水解导致可溶性膳食纤维分子断裂<sup>[19]</sup>,因此辐照处理后的可溶性膳食纤维含量显著低于对照组。低温等离子体处理产生的活性物质使芒果粉细胞壁中的离子键

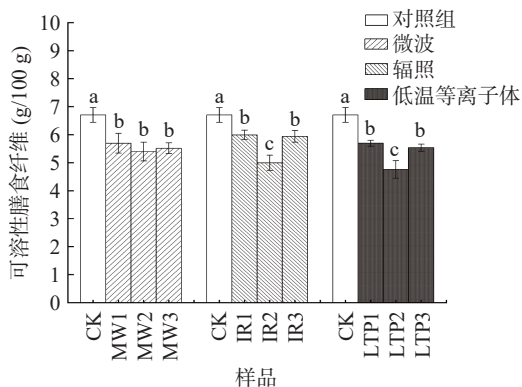


图4 不同物理场处理对芒果粉可溶性膳食纤维的影响

Fig.4 Effects of different physical field treatments on the soluble dietary fiber content of mango powder

和共价键解聚,化学键的破坏导致可溶性膳食纤维的结构发生变化,从而使其含量降低<sup>[7]</sup>。不同物理场处理对芒果粉可溶性膳食纤维含量具有显著影响,选择合适的处理条件对于保持芒果粉的可溶性膳食纤维含量至关重要。

## 2.7 不同物理场处理对芒果粉活性成分及抗氧化能力的影响

不同物理场处理对芒果粉总酚的影响如表3所示。与对照组相比,低功率微波处理(100 W)降低了总酚含量,而较高功率(300、500 W)则增加了总酚含量,原因可能是较高功率微波破坏了芒果粉的细胞壁结构,诱导多聚体的解聚效应,促进更多的游离酚酸释放<sup>[31]</sup>。辐照处理显著提高了总酚含量( $P<0.05$ ),在8 kGy时达到最高,这可能是由于辐照处理导致大分子酚类化合物断裂降解为小分子酚类化合物,并且糖苷化合物也释放出酚类物质,从而增加了总酚含量<sup>[32]</sup>。低温等离子体处理提高了总酚含量,由于植物酚类物质通常与植物多糖细胞壁相关<sup>[33]</sup>,因此总酚含量增加,可能是由于低温等离子体产生的活性物质通过解聚、破坏共价键和降解细胞壁多糖,增加了酚类物质的释放<sup>[9]</sup>。微波处理显著提高了芒果粉维生素C含量( $P<0.05$ ),在500 W时达到最高,表明微波可促进维生素C的释放。2 kGy辐照处理显著提高了维生素C含量( $P<0.05$ ),这可能是由于辐照处理破坏样品的细胞壁和细胞膜,从而释放出更多的维生素C;20 kV低温等离子体处理可显著提高了维生素C含量,然而,由于维生素C对辐照和等离子体处理过程中产生的氧化物质(OH-和NO-)敏感,因此较高剂量(4、8 kGy)辐照和较高电压(30、40 kV)低温等离子体处理会导致维生素C分解。

与对照组相比,低功率微波处理(100 W)提高了ABTS<sup>+</sup>自由基清除率,100~500 W微波处理显著提高DPPH自由基清除能力( $P<0.05$ ),这可能由于微波处理可导致芒果粉分子结构中双键的形成,这些双键具有更强的抗氧化活性,能够有效地中和自由基<sup>[34]</sup>。在辐照组中,高剂量处理导致ABTS<sup>+</sup>自由基清除率下降,而DPPH自由基清除能力则显著增加,这可能是由于辐照导致样品组织完整性改变,从而释

表3 不同物理场处理对芒果粉活性成分及抗氧化能力的影响

Table 3 Effects of different physical field treatments on the active components and antioxidant capacity of mango powder

处理方式	样品	总酚(mg/g)	维生素C(μg/mL)	ABTS <sup>+</sup> 自由基清除率(%)	DPPH自由基清除率(%)
未处理	CK	8.04±0.11 <sup>ABcβ</sup>	43.79±0.52 <sup>Cbδ</sup>	86.83±1.46 <sup>Aaaβ</sup>	54.91±0.50 <sup>Cby</sup>
	MW1	7.67±0.17 <sup>B</sup>	55.30±1.71 <sup>A</sup>	87.3±2.44 <sup>A</sup>	66.92±2.68 <sup>A</sup>
微波	MW2	8.16±0.19 <sup>AB</sup>	48.18±2.73 <sup>B</sup>	79.52±3.12 <sup>B</sup>	68.81±0.97 <sup>A</sup>
	MW3	8.49±0.38 <sup>A</sup>	57.73±2.62 <sup>A</sup>	74.76±2.97 <sup>C</sup>	62.14±2.93 <sup>B</sup>
辐照	IR1	8.75±0.42 <sup>ab</sup>	58.79±2.12 <sup>a</sup>	88.89±0.99 <sup>a</sup>	61.26±0.61 <sup>a</sup>
	IR2	8.56±0.06 <sup>b</sup>	47.35±0.56 <sup>b</sup>	81.59±3.35 <sup>b</sup>	62.70±1.44 <sup>a</sup>
	IR3	9.15±0.11 <sup>a</sup>	45.23±0.53 <sup>b</sup>	77.62±1.48 <sup>c</sup>	61.54±2.93 <sup>a</sup>
低温等离子体	LTP1	8.38±0.19 <sup>aβ</sup>	54.24±0.47 <sup>a</sup>	82.7±1.93 <sup>β</sup>	58.87±0.5 <sup>aβ</sup>
	LTP2	8.16±0.33 <sup>aβ</sup>	45.61±1.31 <sup>γ</sup>	90.48±2.08 <sup>a</sup>	59.37±0.89 <sup>a</sup>
	LTP3	8.41±0.17 <sup>a</sup>	48.48±0.35 <sup>β</sup>	72.38±3.9 <sup>γ</sup>	57.86±0.79 <sup>β</sup>

放出更多抗氧化化合物<sup>[35]</sup>。低温等离子体组的 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率随电压增加先上升后下降,其原因可能是在处理过程中,样品中的抗氧化活性物质被较高电压低温等离子体产生的自由基、带电粒子、臭氧和紫外线破坏所致;DPPH 自由基清除能力随处理电压增加显著提高,可能是由于蚀刻作用改变了芒果粉表面结构,促进了抗氧化活性物质的释放<sup>[36]</sup>。DPPH 和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率测定的机制主要通过生物活性物质通过单电子转移来实现<sup>[37]</sup>。尽管处理后芒果粉的总酚和维生素 C 含量增加,且酚类物质和维生素 C 具有抗氧化效应,但同样的处理参数下,芒果粉抗氧化活性并没有相应增加,这可能是由于物理场处理导致了新的酚类化合物和维生素 C 的释放和生成,而这些化合物不一定通过单电子转移来发挥抗氧化活性<sup>[38]</sup>。

## 2.8 芒果粉各检测指标的相关性分析及最优处理参数确定

不同物理场处理后,芒果粉每个指标之间的相关性分析结果如图 5 所示。 $L^*$  值与溶解性和 DPPH 自由基清除率呈极显著正相关( $P<0.01$ ), $a^*$  和  $b^*$  值与总酚含量有极显著正相关性( $P<0.01$ ),总酚含量的增加可使其芒果粉氧化聚合产生更多新的色素颗粒<sup>[29]</sup>,与前文所述结果一致。水分活度和可溶性膳食纤维呈极显著正相关性( $P<0.01$ ),与 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率呈显著正相关( $P<0.05$ ),与 Tgi 和溶解度呈极显著负相关性( $P<0.01$ );说明水分活度对溶解度和可溶性膳食纤维影响较大。溶解度与  $L^*$  值、Tgi 和 DPPH 自由基清除率呈极显著正相关性( $P<0.01$ ),表明溶解度升高有助于释放更多生物活性物质且提高芒果粉微生物稳定性和抗氧化能力。

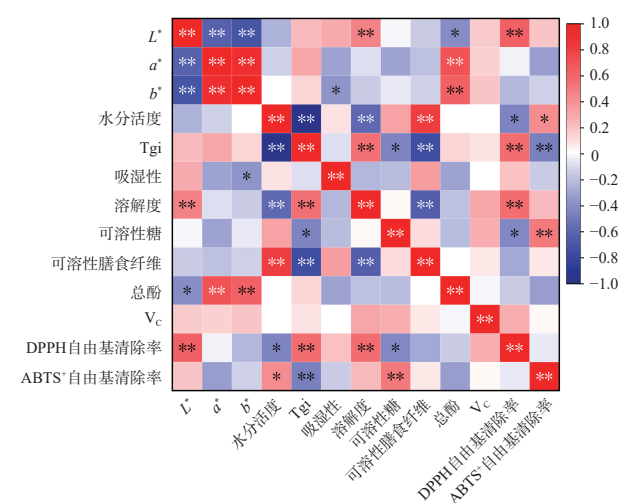


图 5 芒果粉各指标的相关性分析热图

Fig.5 Heatmap of the correlation analysis of various indicators of mango powder

注:“\*”代表差异显著( $P<0.05$ );“\*\*”代表差异极显著( $P<0.01$ )。

综合前文研究结果,各组中 MW1、IR1 和 LTP2 的色泽、吸湿性、溶解度、ABTS<sup>+</sup>自由基清除率最

佳,MW2、IR2、LTP3 水分活度最低,Tgi 最高;MW3、IR1、LTP2 可溶性糖含量最高;MW1、IR1、LTP1 可溶性膳食纤维含量最高;MW3、IR3、LTP3 总酚含量最高;MW3、IR1、LTP1 维生素 C 含量最高,MW2、IR2、LTP2 的 DPPH 自由基清除率最高。虽然微波 100 W(MW1)和辐照 2 kGy(IR1)的水分活度最高、Tgi 最低,但较高的微波功率(300、500 W)和较高的辐照剂量(4、8 kGy)会导致总酚、维生素 C、可溶性糖和可溶性膳食纤维含量降低;而微波 100 W 和辐照 2 kGy 能在保持营养物质的同时最大限度提高其粉质特性,并且耗能最低。低温等离子体 30 kV(LTP2)水分活度高于 LTP3,但无显著差异;尽管 LTP2 的总酚和维生素 C 含量最低,但其抗氧化活性显著高于其余两组。因此,将微波 100 W,辐照 2 kGy 和低温等离子体 30 kV 确定为最佳处理工艺。

## 3 结论

本实验探究了三种物理场处理(微波、辐照、低温等离子体)对冻干芒果粉品质的影响,结果表明,三种物理场处理有效保持了芒果粉的色泽,显著降低了芒果粉水分活度,提高了溶解度,2 kGy 辐照和 30 kV 低温等离子体处理显著增加可溶性糖含量,其余处理条件均降低可溶性糖和可溶性膳食纤维含量,三种物理场处理有助于提高芒果粉总酚、V<sub>C</sub> 含量和抗氧化能力;综合各指标分析结果得出 100 W 微波处理,2 kGy 辐照处理和 30 kV 低温等离子体处理为各组中最佳处理条件。本研究进一步验证了物理场处理技术在提高水果粉品质方面的有效性,并为工艺优化提供了系统性数据,为高品质水果粉加工生产提供了有价值的参考;然而本实验现只从宏观角度进行研究,后续将从微观方面深入分析物理场对芒果粉的影响,并探索多种物理场组合处理的潜力,以实现更高效的处理效果和获得更优质的产品。

© The Author(s) 2025. 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] 宋璐瑶,刘东红.芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J].现代食品科技,2021,37(11): 231-238. [SONG L Y, LIU D H. Mass transfer kinetics and quality analysis of mango under vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 231-238.]
- [2] BEI X R, YU X J, ZHOU C S, et al. Improvement of the drying quality of blueberries by catalytic infrared blanching combined with ultrasound pretreatment[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138983.
- [3] BOATENG I D. Thermal and nonthermal assisted drying of fruits and vegetables. Underlying principles and role in physico-chemical properties and product quality[J]. Food Engineering Reviews, 2023, 15(1): 113-155.
- [4] YUAN L, LAO F, SHI X, et al. Effects of cold plasma, high



- hydrostatic pressure, ultrasound, and high-pressure carbon dioxide pretreatments on the quality characteristics of vacuum freeze-dried jujube slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 90: 106219.
- [5] SALEHI F, INANLOODOGHOUS M, GHAZVINEH S. Influence of microwave pretreatment on the total phenolics, antioxidant activity, moisture diffusivity, and rehydration rate of dried sweet cherry[J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11: 7870–7876.
- [6] KUMAR D V, NAIK B, GUPTA A, et al. Effect of high  $\gamma$ -irradiation on dosage on physicochemical, functional and emulsion properties of almond gum powder[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123898.
- [7] LI J F, ZHOU Y J, LU W H. Enhancement of haskap vacuum freeze-drying efficiency and quality attributes using cold plasma pretreatment[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 17: 1059–1071.
- [8] DARFOUR B, OFORI H, ASARE I. Gamma irradiation and drying method: The effects on kola nut powder[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 185: 109489.
- [9] KHOSHKALAM POUR A, KHORRAM S, EHSANI A, et al. Atmospheric cold plasma effect on quality attributes of banana slices: Its potential use in blanching process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 76: 102945.
- [10] 许文静, 陈昌琳, 邓莎, 等. 不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(6): 89–95. [XU W J, CHEN C L, DENG S, et al. Effects of different pretreatment methods on quality characteristics of freeze-dried blueberry powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 89–95.]
- [11] 赵静, 罗玲慧, 刘雨蝶, 等. 不同载体剂对冻干生姜粉末品质的影响[J]. *中国调味品*, 2024, 49(4): 38–43. [ZHAO J, LUO L H, LIU Y D, et al. Effect of different carrier agents on quality of freeze-dried ginger powder[J]. *China Condiment*, 2024, 49(4): 38–43.]
- [12] 曹汝鸽, 武小晖, 黄文达. 微波处理对大米储藏过程中脂质变化的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(4): 247–256. [CAO R G, WU X H, HUANG W D. Effect of microwave treatment on the changes in lipids of rice during storage[J]. *Food Science*, 2024, 45(4): 247–256.]
- [13] CHEN Y, ZHANG Y F, JIANG L, et al. Moisture molecule migration and quality changes of fresh wet noodles dehydrated by cold plasma treatment[J]. *Food Chemistry*, 2020, 328: 127053.
- [14] ZHAO J H, LIU F, WEN X, et al. State diagram for freeze-dried mango: Freezing curve, glass transition line and maximal-freeze-concentration condition[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 157: 49–56.
- [15] ZHAO Y T, JIANG Y J, ZHENG B D, et al. Influence of microwave vacuum drying on glass transition temperature, gelatinization temperature, physical and chemical qualities of lotus seeds[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 167–176.
- [16] 王彩霞, 吴敏, 鲁鹏, 等.  $\gamma$ 辐照对纤维素纳米纤维膜结构及性能的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 119–128. [WANG C X, WU M, LU P, et al. Effect of  $\gamma$ -irradiation on structure and properties of cellulose nanofibrils film[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(5): 119–128.]
- [17] 王雅娟, 刘琦, 牟光庆, 等. 介质阻挡放电低温等离子体对酪蛋白粉末结构及成膜性影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(22): 48–57. [WANG Y J, LIU Q, MOU G Q, et al. Influences on structure and film-forming property of films made from casein powder modified using dielectric barrier discharge cold plasma[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(22): 48–57.]
- [18] 徐恩光, 林兰英, 李善明, 等. 微波处理对樟子松木材等温吸湿特性的影响[J]. *木材科学与技术*, 2021, 35(1): 20–25. [XU E G, LIN L Y, LI S M, et al. Effect of microwave treatment on moisture sorption isotherm of mongolian scotch pine[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2021, 35(1): 20–25.]
- [19] HUSSAIN P, WANI I, RATHER S, et al. Effect of post-processing radiation treatment on physico-chemical, microbiological and sensory quality of dried apple chips during storage[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 182: 109367.
- [20] 万雪杰, 郭效德, 欧阳刚. 应用低温等离子体技术对超细AP粉体表面改性[J]. *含能材料*, 2016, 24(1): 79–84. [WAN X J, GUO X D, OUYANG G. Application of low-temperature plasma technique in surface modification of superfine AP powder[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(1): 79–84.]
- [21] LI L L, CHEN J L, BAI D Q, et al. Physicochemical, pasting properties and *in vitro* starch digestion of Chinese yam flours as affected by microwave freeze-drying[J]. *Foods*, 2022, 11: 2324.
- [22] SHEN H Y, HOU Y J, XI M H, et al. Electron beam irradiation enhanced extraction and antioxidant activity of active compounds in green walnut husk[J]. *Food Chemistry*, 2021, 373: 131520.
- [23] 祝红, 牛德宝, 张灿, 等. 低温等离子体技术改性纤维素的研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 18–25. [ZHU H, NIU D B, ZHANG C, et al. Research progress of cellulose modified by cold plasma technology[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 18–25.]
- [24] 王兆凯, 任广跃, 段续, 等. 碱性油酸乙酯+超声预处理对枸杞热泵干燥特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(5): 230–236. [WANG Z K, REN G Y, DUAN X, et al. Effect of ultrasonic+alkaline ethyl oleate pretreatment on heat pump drying characteristics of *Lycium barbarum*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(5): 230–236.]
- [25] YU X, HUANG S S, YANG F, et al. Effect of microwave exposure to flaxseed on the composition, structure and techno-functionality of gum polysaccharides[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 125: 107447.
- [26] ZHAO Y N, GENG J H, ZHANG Y, et al. Changes in sugar metabolism and fruit quality of different pear cultivars during cold storage[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2019, 25: 389–399.
- [27] 郭晓杰, 田海, 马晨, 等. 不同芒果品种果实可溶性糖组分含量特征分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(11): 125–132. [GUO X J, TIAN H, MA C, et al. Analysis of the content characteristics and soluble sugar components of mango fruits from various cultivars[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(11): 125–132.]
- [28] 陶源. 微波场下典型小分子糖溶液的介电响应及其蒸发特性研究[D]. 无锡: 江南大学; 2022. [TAO Y. Dielectric response and evaporation characteristics of typical sugar solutions under microwave fields[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [29] 解梦梦, 赵武奇, 贾梦科, 等. 低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片质构及理化特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 133–142. [XIE M M, ZHAO W Q, JIA M K, et al. Effects of low temperature plasma treatment on texture and physicochemical properties of fresh-cut kiwi slices[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(10): 133–142.]
- [30] 肖志刚, 元沅, 高岩, 等. 不同处理方式对豆渣可溶性膳食纤维得率及理化特性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(21): 35–43. [XIAO Z G, YUAN Y, GAO Y, et al. Effects of different treated methods on the soluble dietary fiber yield and

physicochemical properties of soybean residue[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(21): 35–43. ]

[ 31 ] 邓淑君, 郝琴, 万楚筠, 等. 微波预处理对油莎豆贮藏稳定性及其油脂脂质伴随物含量的影响[J]. *中国油脂*, 2024, 49(2): 1–9, 41. [ DENG S J, HAO Q, WAN C J, et al. Effects of microwave pretreatment on storage stability of tiger nut and lipid concomitant content of its oil[J]. *China Oils and Fats*, 2024, 49(2): 1–9,41. ]

[ 32 ] AYOB O, HUSSAIN P, SURADKAR P, et al. Gamma irradiation and storage effects on quality and safety of Himalayan Paprika (Waer)[J]. *LWT*, 2021, 147: 111667.

[ 33 ] HERCEG Z, BURSAC KOVAČEVIĆ D, GAJDOŠ KLJUSURIĆ J, et al. Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 665–672.

[ 34 ] CHOI J I, KIM J K, KIM J H, et al. Degradation of hyaluronic acid powder by electron beam irradiation, gamma ray irradiation, microwave irradiation and thermal treatment: A comparative study [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 79: 1080–1085.

[ 35 ] BHAT N, WANI I, HAMDANI A. Effect of gamma-irradiation on the thermal, rheological and antioxidant properties of three wheat cultivars grown in temperate Indian climate[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 176: 108953.

[ 36 ] NABILA M S N, ADRIANI D, ZULFAHMI Z, et al. Pengaruh praperlakuan dingin antera terhadap pembentukan kalus cabai merah keriting (*Capsicum annuum* L.) pretreatment on the callus formation of curly red chilli pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 2020, 4: 94–105.

[ 37 ] XUE M, WANG Z, SUN S F, et al. Mechanism investigation on the formation of high valent iron intermediate in Fe(VI) oxidation using ABTS as a probe: Effect of excess Fe(VI)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387: 124123.

[ 38 ] ELIAS M I, MADUREIRA J, SANTOS P, et al. Preservation treatment of fresh raspberries by e-beam irradiation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102487.