缪瑞茵, 张健, 陈恺, 等. 不同预处理对赛买提杏片干燥特性及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 22−33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030302

MIAO Ruiyin, ZHANG Jian, CHEN Kai, et al. Effects of Different Pretreatments on Drying Characteristics and Quality of Saimaiti Apricot Slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 22−33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030302

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

# 不同预处理对赛买提杏片干燥特性及品质的影响

缪瑞茵[1,2], 张　健[2], 陈　恺[1], 孟新涛[2], 马　燕[2], 张　婷[2], 许铭强[2,*]

（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830091）

**摘　要:** 本文以新鲜赛买提杏片为对照组（CK），探究热水漂烫（Hot Water Blanching，HWB）、高压静电场（High-voltage Electric Field，HEF）和常压射流等离子体（Atmospheric Pressure Plasma Jet，APPJ）3 种预处理方式对杏片热泵干燥特性、水分组成、微观结构和物理化学特性的影响。结果表明：HEF 预处理与 CK 组在干燥速率和品质特性上无显著差异；APPJ 处理后的干燥时间最短，为 22 h，分别比 CK、HWB 和 HEF 处理缩短了 35.29%、17.65% 和 35.29%；CK 和 HEF 预处理的最佳数学拟合模型为 Wang and Singh，HWB 和 APPJ 预处理的最佳数学拟合模型为 Page；相较于 CK，HWB 与 APPJ 预处理均能破坏细胞壁及中胶层结构，其中 APPJ 处理组细胞壁孔隙度显著增加，水分迁移阻力显著降低（$P<0.05$）。果胶组分分析进一步证实，APPJ 预处理通过增加水溶性果胶（WSP）含量，降低螯合果胶（CSP）和碱溶性果胶（NSP）含量，明显改变细胞壁的机械强度和孔隙率；在抗氧化特性方面，HWB 与 APPJ 预处理均显著提高 DPPH 自由基清除率及 FRAP 值，其中 APPJ 组表现尤为突出，其总酚（176.40±8.19 mg/kg）及类胡萝卜素（32.64±0.83 mg/kg）保留率显著优于其他处理组，且硬度、多酚氧化酶（PPO）和过氧化物酶（POD）活性则显著降低（$P<0.05$），有效抑制了酶促褐变，保持了杏片的鲜亮色泽。综上所述，APPJ 预处理通过破坏细胞结构、改变果胶组分、抑制酶促褐变及保护抗氧化活性物质，显著提高了杏片的干燥效率和品质特性，是一种高效、绿色的预处理方法，具有广阔的应用前景。

**关键词:** 预处理, 热泵干燥, 赛买提杏, 低温等离子体, 干燥动力学, 抗氧化活性

**中图分类号:** TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0022−12

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025030302

本文网刊:

# Effects of Different Pretreatments on Drying Characteristics and Quality of Saimaiti Apricot Slices

**MIAO Ruiyin[1,2], ZHANG Jian[2], CHEN Kai[1], MENG Xintao[2], MA Yan[2], ZHANG Ting[2], XU Mingqiang[2,*]**

（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2.Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Research Center for Deep Processing Engineering of Major Agricultural and Sideline Products, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China）

**Abstract:** This study investigated the effects of three pretreatment methods-hot water blanching (HWB), high-voltage electric field (HEF), and atmospheric pressure plasma jet (APPJ)-on the heat pump drying characteristics, moisture distribution, microstructure, and physicochemical properties of Saimaiti apricot slices, with fresh slices serving as the

**收稿日期:** 2025−03−25

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区重点研发专项项目（2022B0206-02）; 新疆农科院农业科研创新稳定支持项目（xjnkywdzc-2023003-2-5）。

**作者简介:** 缪瑞茵（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬干燥技术研究, E-mail: 1581964737@qq.com。

*** 通信作者:** 许铭强（1987−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 特色农产品加工品质调控及副产物综合利用, E-mail: xmq2046@hotmail.com。

control (CK). The results demonstrated that HEF pretreatment showed no significant differences in drying rate and quality characteristics compared to CK. APPJ treatment achieved the shortest drying time (22 h), representing reductions of 35.29%, 17.65%, and 35.29% compared to CK, HWB, and HEF treatments, respectively. The Wang and Singh model best fit the drying curves of CK and HEF samples, while the Page model was most suitable for HWB and APPJ samples. Microscopic analysis revealed that both HWB and APPJ pretreatments disrupted cell wall and middle lamella structures, with APPJ treatment particularly enhancing cell wall porosity and reducing moisture migration resistance. Pectin component analysis confirmed that APPJ pretreatment significantly altered cell wall mechanical strength and porosity by increasing water-soluble pectin (WSP) content while decreasing chelate-soluble (CSP) and alkali-soluble (NSP) pectin fractions. Regarding antioxidant properties, both HWB and APPJ pretreatments significantly improved DPPH radical scavenging activity and FRAP values, with APPJ showing superior performance in retaining total phenolics (176.40±8.19 mg/kg) and carotenoids (32.64±0.83 mg/kg). Furthermore, APPJ treatment effectively inhibited enzymatic browning by reducing hardness, polyphenol oxidase (PPO), and peroxidase (POD) activities while maintaining brighter color. These findings demonstrate that APPJ pretreatment enhances drying efficiency and product quality through cell structure modification, pectin component alteration, enzymatic browning inhibition, and antioxidant preservation, representing an efficient and eco-friendly pretreatment method with significant potential for industrial applications.

**Key words**: pretreatment; heat pump drying; Saimaiti apricot; low-temperature plasma; drying kinetics; antioxidant activity

杏（*Prunus armeniaca* L.）是新疆特色经济林果资源，其中赛买提杏作为主要加工品种[1]，在采后极易因高温和高湿环境导致软化腐烂，严重影响其商品价值和加工品质[2]。目前，干制加工主要采用热风干燥技术[3]，虽设备简单易操作，但普遍存在能耗高、干燥不均匀、产品品质不稳定及环境污染等问题[4]。近年来，热泵干燥技术因其高效节能和精准控温控湿的特点，在热敏性果蔬加工领域更具应用潜力[5]，但该技术在实际应用中存在干燥前期物料升温缓慢、后期干燥效率低以及产品质构硬化等突出问题[6]，难以实现能效提升与品质保持的协同优化。因此，如何通过预处理技术与热泵干燥工艺的协同优化来提高干燥效率已成为当前研究热点[7]。研究表明，适宜的预处理技术不仅能显著缩短干燥时间，还能有效保留产品中的生物活性物质和营养成分，同时降低加工能耗[8]。特别是新型非热预处理技术，凭借其低温加工特性，在最大限度保持产品品质方面具有显著优势[7]。

在食品干燥加工领域，预处理技术的选择直接影响最终产品的品质和加工效率[9]。传统热预处理技术（如热烫）依赖高温介质的传热作用来改变物料特性并促进干燥过程[10]，但高温易导致热敏性营养物质降解、感官品质劣变以及色泽稳定性下降等问题[11]，制约了其应用范围。以红外线、超声波、高压电场和低温等离子体等为代表的新型非热预处理技术，通过物理场能（而非热传导）直接作用于物料内部水分迁移过程，在避免热损伤的同时实现了更高效、更均匀的预处理效果[12]。相关研究显示，高压静电场和低温等离子体技术因其突出的相对优势，已成为广泛应用的热点方向[4]。高压静电场处理可显著改善产品品质，整体收缩更少[13]。Çakmak 等[14] 的研究证实，电场和超声联合预处理可使香菇干燥效率提升了 37.10%。此外，低温等离子体技术因其环保高效的特点，通过改变物料表面微观结构，不仅能促进水分迁移，还能激活生物活性物质[15]。Wu 等[16] 研究发现，该技术可使辣椒、扁豆和豌豆的干燥时间分别缩短了 18.75%~33.33%。然而，目前针对杏片干燥的预处理技术研究仍显不足。深入探讨不同预处理方式对杏片干燥特性及品质的影响，对于开发高效节能的杏干加工新工艺具有重要意义，也将为新疆特色林果资源的高值化利用提供新的技术支撑。

因此，本研究以赛买提杏片为研究对象，选取热漂烫、高压静电场和常压射流等离子体三种预处理方式，并将其分别与热泵干燥工艺相结合，系统研究不同预处理方式对赛买提杏片热泵干燥特性的影响。通过深入分析不同预处理下水分组成、微观结构和物理化学特性的变化规律，探讨细胞壁微观结构及果胶结构的演变，旨在开发预处理-热泵干燥协同技术。不仅为高品质赛买提杏片的高效节能加工新技术提供了理论依据，也为提升果蔬干燥效果和开发绿色、高效的联合干燥技术提供了新的思路和方法。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

赛买提杏　采自新疆喀什地区英吉沙县，选择新鲜饱满、无腐烂、无病虫害、无机械伤、大小匀称的果实，初始含水率（湿基）为 78.89%±2.52%；氢氧化钠、无水乙醇、无水碳酸钠、丙酮、盐酸、浓硫酸、正己烷、甲醇、醋酸钠、三氯化铁、愈创木酚、冰醋酸、无水醋酸钠、过氧化氢、邻苯二酚、戊二醛、磷酸缓冲液（均为分析纯）　天津市致远化学试剂有限公司；无水柠檬酸（食品级）、D-异抗坏血酸钠（食品级）；1,2-环己二胺四乙酸标准品、半乳糖醛酸标准品、*β*-胡萝卜素标准品、福林-酚试剂、没食子酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH）　北京索莱宝科技有限公司；总抗氧化能力（FRAP 法）试剂盒、多酚氧化酶（PPO）活性检测试剂盒、过氧化物酶（POD）活性检测试剂盒　上海通蔚生物科技有限公司。

PG-1000ZF 射流低温等离子体　南京苏曼等离

子体科技有限公司; EMFI-T1 可视化食品磁电耦合处理系统　英都斯特(无锡)感应科技有限公司; WRH-100TB1 热泵干燥机　广东威尔信实业有限公司; XMTD-7000(SY)电热恒温水浴锅　北京市永光明医疗仪器有限公司; 85-2B 恒温磁力搅拌器　江苏金怡仪器科技有限公司; T9 紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司; TP-A2000 电子天平　华志(福建)电子科技有限公司; A11 研磨机　深圳市科力易翔仪器设备有限公司; PAL-BXIACID2 糖酸仪　ATAGO(爱拓)中国分公司; TGL-20bR 冷冻离心机　上海安亭科学仪器厂; CR-400 色差仪　上海铂鳞贸易有限公司; MA35 红外水分测定仪　德国赛多利斯公司; KQ32200DE 超声波清洗机　昆山市超声仪器有限公司; PHBJ-260F 便携式 pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司; TMS-Pro 质构仪　美国 FTC 公司; EM UC6 超薄切片机　德国徕卡公司; H7650 TEM 透射电子显微镜　日本日立公司; SPM-9700 原子力显微镜　日本岛津公司; MesoMR23-060H-I 低场核磁共振波谱仪　上海纽迈电子科技有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　将鲜杏洗净, 用不锈钢刀沿果实缝合线切半去核备用。

1.2.2　处理方法　a.对照实验(CK): 样品不经任何处理。

b.热水漂烫(Hot Water Blanching, HWB): 先对杏果实进行护色, 护色工艺参考伊丽达娜·开赛尔等[17] 的方法, 稍作修改, 将已经切分好的杏子样品放入 0.2%(w/v)D-异抗坏血酸钠和 0.6%(w/v)柠檬酸复合护色液中(料液比 1∶3)浸泡。根据团队前期已有的研究基础[18] 并结合预实验, 确定杏片在 95 ℃的热水中漂烫 180 s, 随后迅速冷却至室温, 防止漂烫过度。

c.高压静电场(High-Voltage Electric Field, HEF): 参考赵以雪[19] 的方法并结合预实验, 将切分好的杏片平铺置于电场中央, 确定杏片在 40 kV 的静电场中处理 30 min[19]。

d.常压射流等离子体(Atmospheric Pressure Plasma Jet, APPJ): 参考 Du 等[20] 的方法并结合预实验, 将切分好的杏片平铺置于设备上, 喷气高度为 5 cm, 确定杏片在 700 W 的等离子体射流中处理 40 s。

1.2.3　热泵干燥　根据团队前期已有的研究基础和大量预实验结果[21], 预处理后的杏片在 50 ℃、30% 相对湿度的热泵干燥机中干燥, 直至水分含量降至 8%。

1.2.4　杏片干燥动力学　将预处理后的杏片单层平铺于不锈钢网状料盘中, 待设备稳定后, 将装有物料的料盘置于热泵干燥器中。在干燥过程中, 每间隔 60 min 自动称量一次, 导出数据后计算含水率, 直至其含水率降至 8% 干基时停止干燥, 将料盘取出, 待杏干冷却至室温用自封袋包装备用。每组试验重复 3 次。

a.水分比。依照以下公式计算杏片干燥过程中不同时间的水分比(MR):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中, $M_0$、$M_t$ 和 $M_e$ 分别为样品的初始、干燥 t 时刻和干燥到平衡时的干基含水率, g/g。

由于产品的平衡干基含水率 $M_e$ 远低于 $M_0$ 和 $M_t$, 可将公式简化为[22]:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

b.干燥速率。杏片在干燥过程中的干燥速率计算采用如下公式:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1}$$

式中, $t_1$ 和 $t_2$ 为干燥时间, h; $M_{t1}$ 和 $M_{t2}$ 分别为干燥过程中 $t_1$ 和 $t_2$ 的干基含水率, g/g。

c.干燥模型拟合。选用描述果蔬薄层干燥常用模型[23]—Page、Herderson and Pabis、Logarithmic 和 Wang and Singh, 其表达式分别如表 1 所示。

表 1　干燥动力学数学模型

Table 1　Mathematical model of drying dynamics

| 模型序号 | 模型名称 | 模型方程 |
|---|---|---|
| 1 | Page | $MR=\exp(-kt^n)$ |
| 2 | Herderson and Pabis | $MR=a\exp(-kt)$ |
| 3 | Wang and Singh | $MR=a\exp(-kt)+c$ |
| 4 | Logarithmic | $MR=1+at+bt^2$ |

将试验数据 MR 和 t 与上述模型进行拟合分析, 通过卡方检验(Reduced Chi-squre, $\chi^2$)、决定系数($R^2$)和残差平方和(Residual Sum of Squares, RSS)数值的大小来判断拟合度, 选取能够准确描述杏果实干燥的模型。$R^2$ 越接近 1、$\chi^2$ 和 RSS 越小, 则模型拟合度越高。$\chi^2$、$R^2$ 和 RSS 的计算分别如公式下所示[24]。

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N\text{-}z}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{exp})^2}$$

$$RSS = \sum_{i=1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2$$

式中, $\chi^2$、$R^2$ 和 RSS 分别是卡方检验、决定系数和残差平方和。

1.2.5　LF-NMR 测定杏片横向弛豫时间 $T_2$　采用低场核磁共振分析仪测定样品的横向弛豫时间($T_2$), 以表征样品中的水分状态。参考 Shao 等[25] 的测定方法, 略作改进。将样品放入玻璃管中, 然后置于

射频线圈中心位置，进行 Carr-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）脉冲序列扫描测试。测试具体参数设置为：主频 23.3 MHz，磁场强度 0.5 T，测量温度 32 ℃，90°脉冲时间 16 ms，180°脉冲时间 33 ms，回波数 10000，累加次数 4。每组样品重复测量 3 次，取平均值。

1.2.6　杏片微观结构的观察与测定　参考张萌[26]的方法并略作修改，采用透射电镜（Transmission Electron Microscope，TEM）观察杏片组织细胞壁的超微结构。预先在培养皿中滴上 2.5% 的戊二醛固定液，可先切取一小块组织浸入固定液中，剥离出观察部位的果皮和果肉，随后用手术刀切成 1~2 $mm^3$ 的大小，取 2~4 片转移至盛满新鲜 2.5% 的戊二醛固定液的 1.5 mL 离心管中，室温放置 0.5 h 后转入 4 ℃ 冰箱 12 h。然后用磷酸缓冲液冲洗 15 min。再用 1%（v/v）饿酸（0.1 mol/L 磷酸缓冲液配制，pH7.2）在 4 ℃ 条件下固定 2 h，用磷酸缓冲再次冲洗 15 min，这个步骤重复 4 次。然后，用不同体积分数的乙醇（30%、50%、70%、80%、90%、95% 和 100%）和纯丙酮对样品进行梯度脱水。脱水后，将样品用环氧树脂 Epon-812 渗透包埋，在 60 ℃ 下聚合 48 h。最后，用超薄切片机切片，经醋酸双氧铀和柠檬酸铅溶液染色，用 TEM 进行超微结构观测，分别放大 1000 倍和 10000 倍。每个样本至少获取 10 幅图像。

1.2.7　果胶的提取与测定　a.乙醇不溶物制备：参照 Yu 等[27]的方法并略作修改，将果肉去皮后打碎匀浆，取 15 g 样品，加入 100 mL 乙醇（95%，v/v），在水浴锅中煮沸并搅拌 30 min 后过滤，收集残渣；采用同样的操作方法，将残渣重复冲洗 3 次。然后，向残渣中加入 50 mL 丙酮，浸泡 10 min，过滤，收集残渣；此操作重复 3~5 次直至残渣呈白色。最后将残渣于热风干燥箱中 40 ℃ 条件下干至恒重，即为乙醇不溶物（Alcohol Insoluble Residue，AIR）。

b.果胶提取：参照赵邯等[28]的方法并略作修改，依次提取水溶性果胶（Water-Soluble Pectin，WSP）、螯合果胶（Chelator-Soluble Pectin，CSP）和碱溶性果胶（$Na_2CO_3$-Soluble Pectin，NSP）。称取 0.25 g 乙醇不溶物，加入 10 mL 蒸馏水，置于磁力搅拌器上，于室温下匀速搅拌 4 h，然后在 4 ℃ 下离心（10000 r/min，15 min），收集上清液；残渣用蒸馏水再提取 2 次，合并 3 次的上清液，定容至 50 mL，即为 WSP。向上述残渣中加入 10 mL 0.05 mol/L 1,2-环己二胺四乙酸（CDTA），室温下搅拌提取 6 h，然后在 4 ℃ 离心（10000 r/min，15 min），收集上清液；残渣用 0.05 mol/L CDTA 再提取 2 次，合并 3 次的上清液，调整 pH 至 6.5，定容 50 mL，即为 CSP。向上述残渣中加入 10 mL 0.05 mol/L $Na_2CO_3$，混匀后于 4 ℃ 条件下放置 16 h，然后于室温下匀速搅拌提取 6 h；重复上述操作，将残渣再提取 2 次，合并 3 次的上清液，调整 pH 至 6.5，定容至 50 mL，即为 NSP。

c.果胶含量测定：测定果胶含量，采用咔唑硫酸比色法[29]，以半乳糖醛酸（Galacturonic Acid，GalA）含量表示。试验重复 3 次，计算平均值。

d.果胶纳米结构表征：参考 Liu 等[30]的方法，利用原子力显微镜（Atomic Force Microscopy，AFM）表征果胶纳米结构。将果胶溶液稀释至约 10 μg/mL，水浴加热（70 ℃，15 min），振荡分散混匀，吸取 10 μL 滴加于新剥云母片上，室温下自然干燥。然后将云母片固定在铁片上，置于 AFM 样品台，选用 Si3N4 型探针，采用非接触模式，在 0.5~2 Hz 扫描频率下进行测定。每个样品至少获取 10 张图像。

1.2.8　硬度的测定　参考 Liu 等[30]的方法，稍作修改，将处理好的杏片置于装有 P/36 探头的 TMS-Pro 质构仪上，进行 TPA 分析，设置测前速度 5.0 mm/s、测试和测后上行速度 0.5 mm/s、两次压缩时间间隔 10 s、样品受压高度压缩变形 40%、触发力 0.25 N。硬度以第一次压缩最大受力表示，N。每组测定 10 个样品，结果取平均值。

1.2.9　理化指标测定　用手持色差仪对杏片进行颜色的测定，测定杏子的 $L^*$值、$a^*$值、$b^*$值。其中：$L^*$值表示亮度，$L^*$值越大，杏片的亮度越大；$a^*$值表示杏片红绿偏向，它的值越大，红色越深；$b^*$值表示杏片黄蓝偏向，$b^*$值为正值表示黄色；$b^*$值越大，黄色越深。基于 $L^*$、$a^*$和 $b^*$计算色差（$\Delta E$），计算公式如下所示[31]，每组重复测定 3 次，计算平均值。

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

式中，$L_0^*$、$a_0^*$和 $b_0^*$为新鲜未处理样品的色泽参数值，$L^*$、$a^*$和 $b^*$为处理后杏片的色泽参数值。

总酚含量用 Folin-Ciocalteu 方法测定，结果以每 1 kg 样品中没食子酸质量表示，mg/kg[32]。

类胡萝卜素含量参考 Sakooei-Vayghan 等[33]的方法，略作修改，提取杏片中的类胡萝卜素并测定总量。取 1 g 样品于研钵中，分数次加 25 mL 提取液（正己烷∶丙酮∶甲醇=2∶1∶1，v/v/v），研磨匀浆，提取至提取液和残渣为无色，合并提取液，并定容至 25 mL。采用分光光度计在 450 nm 处测定吸光度值。用提取液溶解 $\beta$-类胡萝卜素，并作标准曲线。结果以每 1 kg 样品中 $\beta$-类胡萝卜素质量表示，mg/kg。

DPPH 自由基清除率参考娄世豪等[34]的方法，略作修改，提取液的制备：取 1 g 样品置于容器中，加入 20 mL 80%（v/v）乙醇溶液用超声波于 150 W，25 ℃ 条件下提取 30 min。提取液于 10000 r/min，4 ℃ 条件下冷冻离心 10 min，收集上清液，备用。吸取 2.0 mL 提取液，移入试管中，加入 2.0 mL 0.1 mmol/L DPPH 溶液，混匀，在室温条件下避光静置 30 min。然后用分光光度计于 517 nm 波长下测定吸光度值 $A_1$。分别以 80% 乙醇溶液代替 DPPH溶液和样品溶液，在 517 nm 波长下测定吸光度值 $A_2$、$A_0$，根据公式计算 DPPH 自由基的清除率：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$

式中：$A_1$ 表示 2 mL 样品溶液+2 mL DPPH；$A_2$ 表示 2 mL 样品溶液+2 mL 无水乙醇；$A_0$ 表示 2 mL 无水乙醇+2 mL DPPH。

FRAP 自由基清除率：采用总抗氧化能力(FRAP 法)试剂盒进行测定并计算；多酚氧化酶(PPO)活性和过氧化物酶(POD)活性：采用多酚氧化酶(PPO)活性和过氧化物酶(POD)活性测试试剂盒进行测定并计算。

### 1.3 数据处理

所有实验重复三次，结果表示为平均值±标准差；采用 SPSS 27.0.1 进行数据分析，显著性检验使用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较(差异显著水平为 $P<0.05$)。使用 Origin 2024 和 GraphPad Prism 9.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预处理方式对杏片干燥特性的影响

图 1 展示了不同预处理方式对杏片干燥特性的影响。由图 1A 和图 1B 可知，对照组(CK)及三种预处理方式(HWB、HEF、APPJ)下，杏片含水率降低至 8% 干基以下所需的时间分别为：34、28、34 和 22 h。其中，HWB 和 APPJ 预处理均能显著缩短干燥周期，尤其 APPJ 处理组的干燥时间最短(22 h)，较 CK 组和 HEF 组缩短 35.29%，较 HWB 组缩短 17.65%。相比之下，HEF 处理与 CK 之间未表现出显著差异。这一结果表明，HWB 和 APPJ 预处理在加速干燥过程方面具有显著优势，尤其是 APPJ 预处理效果最为显著。主要原因为杏果实细胞结构和果肉致密性是干燥过程中水分转移的主要障碍，而有效的预处理能够破坏其细胞结构，在细胞表面形成微孔，从而促进水分的迁移[35]，微孔数量的增加显著($P<0.05$)降低了干燥时间。

根据图 1C 的结果，不同预处理下的杏片在整个干燥过程中处于降速干燥，即干燥速率不断下降。而大部分农产品干燥过程均表现为降速干燥[36]。当水分比为 1.0 时，各处理的干燥速率分别为 0.29、0.33、0.45 和 0.53 g/g·min，由此看出干燥速率由高至低依次为：APPJ>HWB>HEF>CK，HWB 和 APPJ 预处理显著提高了杏片干燥速率，这说明 HWB 和 APPJ 用于杏果实干燥前的预处理，能明显提高干燥速率、减少干燥时间，且 APPJ 预处理表现最优。

综上所述，HWB 和 APPJ 预处理在缩短干燥时间和提高干燥速率方面表现出显著优势，尤其是 APPJ 预处理在干燥速率最大值上表现最佳。这表明 APPJ 预处理能够显著促进水分的快速迁移和去除，具有较高的应用潜力。这一发现为优化杏片的干燥工艺提供了重要的理论依据，并为开发高效的预处理技术提供了参考。

为更准确描述不同预处理方法下杏片的热泵干燥行为，对干燥特性实验数据进行拟合分析，并依据 4 种常用的果蔬薄层干燥模型(Page、Henderson and Pabis、Wang and Singh 和 Logarithmic)的参数($\chi^2$、$R^2$ 和 RSS)确定了最适干燥数学模型。

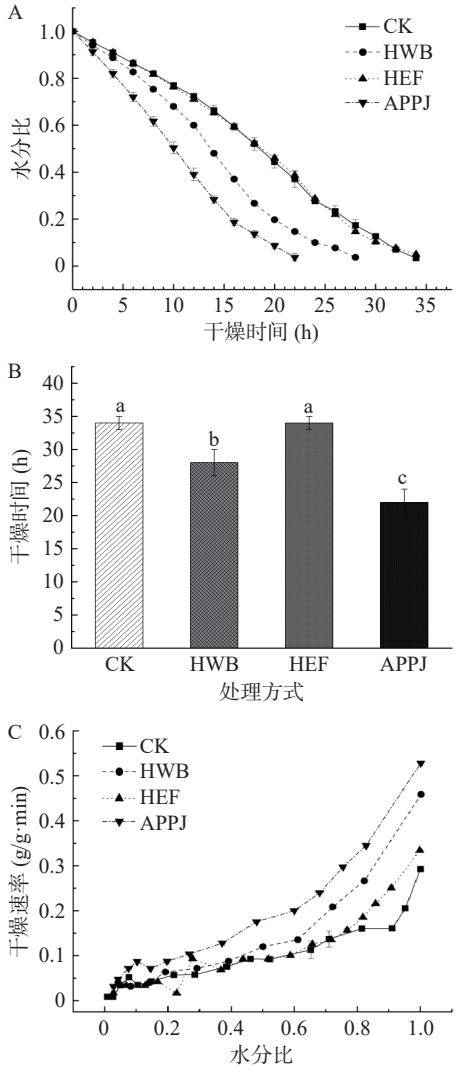



图 1 不同预处理方式对杏片干燥特性的影响

Fig.1 Effects of different pretreatment methods on the drying characteristics of apricot slices

注：不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

拟合结果由表 2 和图 2 可知，Page 模型能够很好地描述 HWB 和 APPJ 预处理下的干燥行为，其 $R^2$ 均大于 0.99，$\chi^2$ 和 RSS 分别为 0.001、0.002(HWB)和 0.001、0.003(APPJ)，表明 Page 模型与这两种预处理方法(HWB 和 APPJ)的拟合度最佳，能够准确反映其水分变化规律。另一方面，Wang and Singh 模型能够很好地描述 CK 和 HEF 预处理下的干燥行为，其 $R^2$ 均大于 0.99，$\chi^2$ 和 RSS 分别为 1.725、0.003(CK)和 1.596、0.003(HEF)，表明 Wang and Singh 模型与 CK 和 HEF 预处理组的拟合度最佳。Page 模型的拟合精度高，能够更好地描述干燥过程中的非线性行为，且广泛应用于多种物料的干燥研究，尤其是薄层干燥。

基于上述结果，Page 模型能够很好地描述 HWB

表 2　不同预处理方式杏片干燥动力学模型拟合

Table 2　Fitting of drying kinetic models for apricot slices with different pretreatment methods

| 模型名称 | 参数 | 处理方式 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | CK | HWB | HEF | APPJ |
| Page | k | 0.003 | 0.015 | 0.003 | 0.004 |
| | n | 1.939 | 1.683 | 1.928 | 1.959 |
| | $R^2$ | 0.990 | 0.998 | 0.989 | 0.998 |
| | RSS | 0.018 | 0.002 | 0.022 | 0.003 |
| | $\chi^2$ | 4.933 | 0.001 | 2.057 | 0.001 |
| Herderson and Pabis | k | 0.052 | 0.092 | 0.052 | 0.071 |
| | a | 1.131 | 1.102 | 1.129 | 1.134 |
| | $R^2$ | 0.913 | 0.949 | 0.912 | 0.924 |
| | RSS | 0.156 | 0.064 | 0.157 | 0.125 |
| | $\chi^2$ | 0.010 | 0.006 | 0.010 | 0.010 |
| Wang and Singh | a | −0.023 | −0.055 | −0.023 | −0.037 |
| | c | −1.825 | 4.313 | −2.061 | 2.012 |
| | k | 1.341 | 0.025 | 1.370 | 0.010 |
| | $R^2$ | 0.998 | 0.993 | 0.998 | 0.982 |
| | RSS | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.029 |
| | $\chi^2$ | 1.725 | 8.493 | 1.596 | 0.002 |
| Logarithmic | a | 226.277 | 2.422 | 221.324 | 4.409 |
| | b | −225.231 | −1.392 | −220.080 | −3.363 |
| | $R^2$ | * | 0.994 | * | 0.985 |
| | RSS | * | 0.009 | * | 0.024 |
| | $\chi^2$ | * | 8.073 | * | 0.002 |

注：表中*表示非线性拟合失败。

和 APPJ 预处理下的热泵干燥行为，而选择 Wang and Singh 模型描述 CK 和 HEF 预处理方法下的水分变化规律。结合图 2b 结果可知，CK 与 HEF 处理组的干燥时间无显著差异，说明其干燥行为具有一致性，进一步证实了模型拟合结果的准确性。相比之下，HWB 和 APPJ 预处理下的干燥行为表现出显著差异，表明这两种预处理方法显著改变了水分的迁移规律，尤其是 APPJ 预处理组的干燥速率最快。这一现象可能是由于 APPJ 预处理更有效地促进了水分迁移和细胞结构的改变，从而显著提升了干燥效率。

## 2.2　不同预处理方式对杏片水分分布状态的影响

低场核磁共振技术（LF-NMR）能快速、高效和无损测定食品水分的分布状态。关键参数弛豫时间（$T_2$）值越大，表明水分的自由度越高，即水分与所处环境的结合程度越低，越容易被去除。通过 LF-NMR 技术分析了不同预处理方式对杏片水分分布及迁移行为的影响，结果如图 3 所示。

三个阶段的信号幅值分别对应杏子体内的三种水态。$T_{21}$（0.1~10 ms）对应样品内部组织中流动性最低的结合水，$T_{22}$（10~100 ms）对应不易流动水，$T_{23}$（>100 ms）对应流动性最强的自由水[37]，$T_{21}$、$T_{22}$、$T_{23}$ 对应的峰面积分别为 $A_{21}$、$A_{22}$、$A_{23}$。峰面积越大，该状态下的含水率越高。从图 3 中可看出，CK 组 $A_{23}$ 的峰面积占比最大（10072.317 a.u），说明新鲜杏中的主要水分状态为游离水，HEF 组也是 $A_{23}$ 的峰面积占比最大（9761.733 a.u），但是小于 CK 的峰面积，说明经过其处理后游离水的含量减少了。经

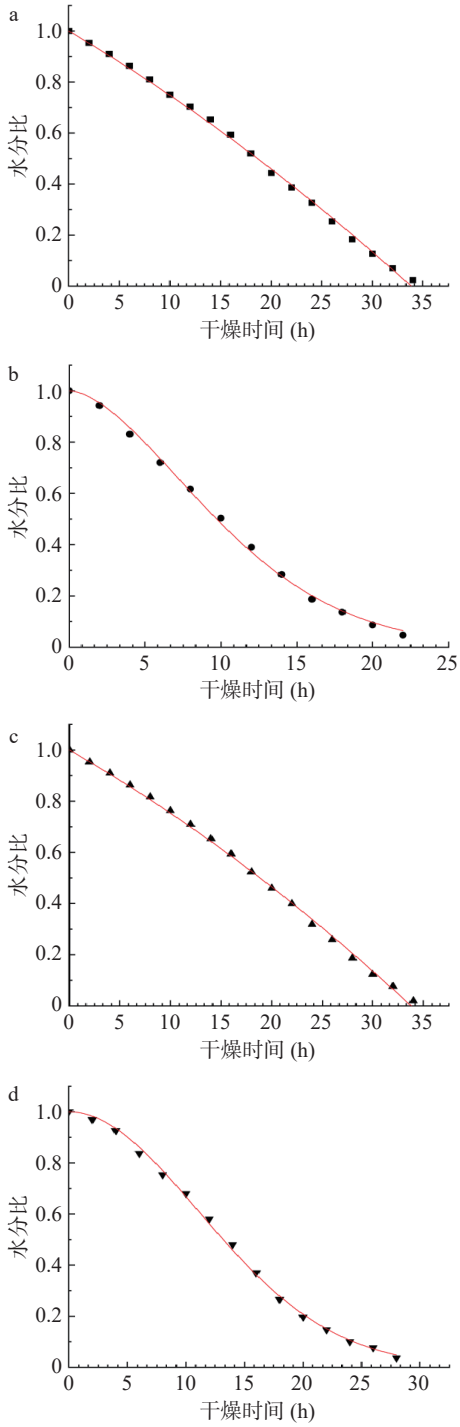



图 2　对照组与高压静电场的 Wang and Singh 模型拟合曲线（a）、（c）和热水漂烫与低温等离子体的 Page 模型拟合曲线（b）、（d）

Fig.2　Wang and Singh model fitting curves (a) and (c) for the control group and high-voltage electrostatic field and Page model fitting curves (b) and (d) for hot water blanching and low-temperature plasma

HWB 和 APPJ 处理后的杏峰面积都划分为三个（$A_{21}$、$A_{22}$、$A_{23}$），由图 3b 可看出，$A_{23}$ 相较于 CK 明显呈下降趋势，分别为 8162.765 和 16.779 a.u。说明 HWB 处理下杏的水分组成仍以自由水为主，而 APPJ 处理下杏中的自由组分基本被完全去除。同时，细胞组织中的水分大部分以结合水和不易流动水的形式存在。该现象主要归因于 APPJ 预处理破

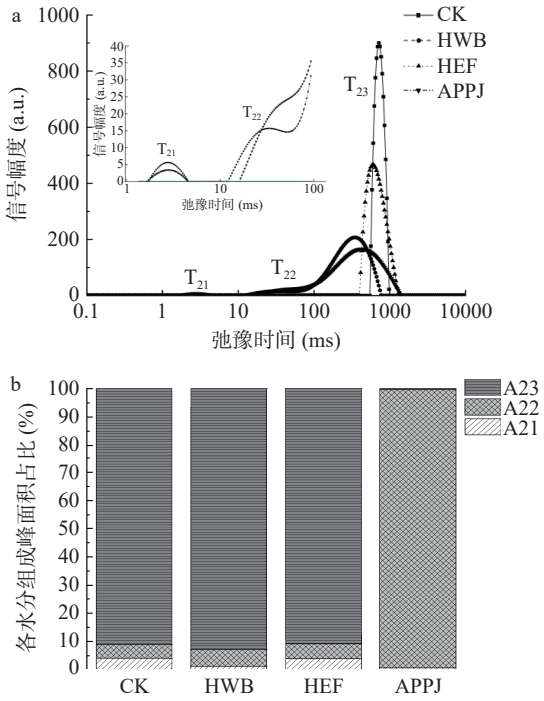



图 3 不同预处理方式对杏片水分分布状态的影响

Fig.3 Effects of different pretreatment methods on the moisture distribution state of apricot slices

坏了细胞结构的完整性，使得原本被细胞质膜包裹的水分得以游离出来。同时，APPJ 预处理还导致细胞壁中的大分子多糖物质（如果胶和纤维素）发生降解，进一步削弱了细胞壁对水分的结合能力[38]。与 CK 相比，经不同预处理方式处理后的杏片，其 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 均向左发生迁移，表明预处理后杏片的 $T_2$ 弛豫时间显著缩短。这一变化可能是由于预处理降低了杏片的含水率，导致水分与基质之间的相互作用增强，从而缩短了弛豫时间。此外，APPJ 预处理过程中细胞结构的破坏和水分迁移通道的形成也可能进一步影响了水分的弛豫行为。

## 2.3 不同预处理方式细胞结构演变对杏片干燥行为的影响

如图 4 所示，CK 中的杏片组织细胞壁完整，细胞排列整齐，细胞壁厚度均匀，中胶层清晰可见，细胞膜完整且紧密贴合于细胞壁内侧。这些特征表明，未经处理的杏片组织具有较高的结构完整性和稳定性，细胞间连接紧密，水分迁移主要通过细胞壁的微孔进行，迁移速率相对较低。这种结构特性与 LF-NMR 分析中 CK 水分分布不均匀、水分主要集中在果肉核心区域的结果一致，表明细胞结构的完整性对水分迁移形成了较大的阻力。

经不同预处理方式处理后，HWB 与 APPJ 处理显著改变了杏片组织的细胞结构。特别是 APPJ 预处理，导致细胞膜破裂、细胞间隙增加、细胞壁松散且肿胀，中胶层逐渐溶解，细胞壁的孔隙度明显增加。这种结构变化与 LF-NMR 分析中 APPJ 预处理后 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 峰向左迁移的结果高度一致，表明细胞壁

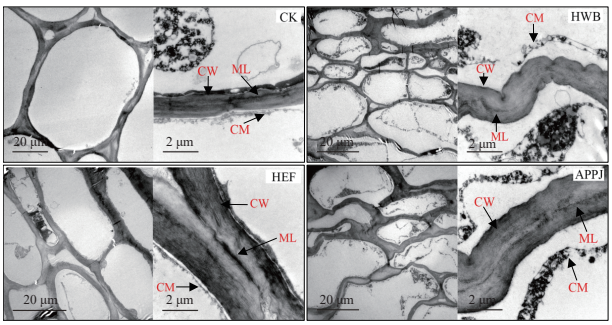



图 4 不同预处理方式对杏片细胞及细胞壁结构的影响

Fig.4 Effects of different pretreatment methods on the cell and cell wall structure of apricot slices

注：CW 为细胞壁，ML 为中胶层，CM 为细胞膜。

结构的破坏显著降低了水分与细胞壁的结合力，促进了水分的自由迁移。这些微观结构的变化与干燥动力学模型分析中 APPJ 预处理显著提高干燥速率的结果相吻合，进一步验证了细胞结构破坏对水分迁移的促进作用。这一结论与 Wang 等[39] 和 Li 等[40] 的研究结果一致，他们发现热烫和低温等离子体处理能够破坏辣椒和玉米的细胞结构，显著提高干燥过程中水分有效扩散系数。

相比之下，HEF 预处理的杏片组织细胞结构与 CK 相比几乎没有明显差异，细胞壁和中胶层的完整性得以保持。这一结果与 LF-NMR 分析中 HEF 预处理组水分分布不均匀、水分迁移阻力较大的现象一致，表明 HEF 预处理未能显著改变细胞结构，因此对干燥速率的提升作用有限。干燥动力学模型分析也显示，HEF 预处理与 CK 的干燥行为较为一致，进一步证实了细胞结构完整性对水分迁移的阻碍作用。

综上所述，细胞结构的变化与水分分布及干燥特性之间存在明显的关联性。APPJ 预处理通过破坏细胞壁和中胶层结构，增加了细胞壁的孔隙度，降低了水分迁移的阻力，从而提高干燥速率。而 HEF 预处理由于未能明显改变细胞结构，因此对干燥速率的提升作用有限。

## 2.4 不同预处理方式的果胶组分与结构变化对杏片干燥行为的影响

细胞壁在维持细胞形状和组织结构中起着至关重要作用，赋予细胞和组织一定的机械强度。果胶作为细胞壁与中胶层的关键组分，其含量、溶解性以及结构变化对细胞壁的强度和孔隙率有显著影响，是导致果实硬度改变的主要因素。

如表 3 所示，不同预处理方式杏片的 WSP、CSP 和 NSP 含量存在显著差异。其中，WSP 含量最高，其次为 NSP，而 CSP 含量最低。WSP 通过非离子键与细胞壁结合，结合能力较弱，其含量的增加是果实组织软化的主要原因之一。相较之下，CSP 和 NSP 分别通过离子键和共价键与细胞壁紧密结合，它们在维持果实组织的完整性和硬度方面发挥着关键作用。因此，WSP 含量的增加以及 CSP 和 NSP

含量的降低，会导致细胞间粘结性减弱和细胞壁机械强度的降低，进而使果实组织质地发生软化[24]。

表 3　不同处理方式对杏片硬度与果胶含量的影响
Table 3　Effects of different processing methods on the hardness and pectin content of apricot slices

| 处理方式 | WSP(mg/L) | CSP(mg/L) | NSP(mg/L) | 硬度(N) |
|---|---|---|---|---|
| CK | 89.53±0.71$^{c}$ | 78.46±1.62$^{a}$ | 82.19±0.84$^{b}$ | 12.40±1.58$^{a}$ |
| HWB | 100.97±0.39$^{b}$ | 76.4±0.87$^{ab}$ | 89.46±0.88$^{a}$ | 6.44±0.48$^{c}$ |
| HEF | 87.85±0.41$^{d}$ | 74.41±0.96$^{bc}$ | 80.3±0.85$^{c}$ | 8.48±0.79$^{b}$ |
| APPJ | 105.5±0.1$^{a}$ | 72.27±0.89$^{c}$ | 80.11±0.09$^{c}$ | 4.02±0.69$^{d}$ |

注：同列不同小写字母表示差异显著($P$<0.05)。

实验结果显示，杏片硬度与 WSP、CSP 和 NSP 具有相关性。这表明 WSP 的增加和 CSP 及 NSP 的减少均会导致果实硬度的降低。APPJ 预处理后的 WSP 含量最高，达到 105.50 mg/L，而 CSP 和 NSP 含量最低，分别为 72.27 mg/L 和 80.11 mg/L。这与 Deng 等[24] 和 Ella 等[41] 的研究结果相一致，进一步证实了果胶组分变化对果实硬度的显著影响。同时，WSP 含量的增加会导致细胞壁松散，孔隙率增大，形成更多水分迁移通道；而 CSP 与 NSP 含量的减少会削弱细胞壁的机械强度和粘结性，促进细胞间分离，使得水分更易通过胞间空隙迁移。APPJ 预处理通过破坏细胞壁和中胶层结构，增加了细胞壁的孔隙度，降低了水分迁移的阻力，从而显著提高了干燥速率。而 HEF 预处理由于未能显著改变细胞结构，因此对干燥速率的提升作用有限。因此，果胶的降解不仅降低了水分迁移的阻力，还延缓了表面硬化，从而缩短了干燥时间并提高了干燥速率。

为进一步阐明果胶与干燥特性之间的关系，采用原子力显微镜(AFM)技术，进行不同预处理方式对杏片 WSP、CSP 和 NSP 纳米结构的影响进行分析，结果如图 5 所示。发现 WSP、CSP 和 NSP 的结构特征在不同预处理条件下存在明显差异。

在 CK 中，WSP 呈现为线型长链和聚集体结构(W-CK)，聚集体的形成主要归因于分子间的相互作用。经 HEF 预处理后，WSP 的链长和聚集体尺寸变化不明显(W-HEF)；HWB 预处理下，聚集体尺寸减小，但链长变化不显著(W-HWB)；而 APPJ 预处理下，WSP 的长链发生降解，形成众多短链，聚集体的尺寸也显著减小(W-APPJ)。这表明 APPJ 处理对 WSP 的纳米结构影响最为显著，导致其链长和聚集体尺寸均显著降低。

对于 CSP，CK 中的 CSP 呈现出具有丰富分支的长链结构(C-CK)；HEF 预处理下，CSP 的长链和分支结构无明显变化(C-HEF)；HWB 预处理下，CSP 的长链变短、分支数量减少，聚集体尺寸减小(C-HWB)；而 APPJ 预处理下，CSP 的长链和分支结构几乎完全消失(C-APPJ)，表明 APPJ 预处理对 CSP 的纳米结构破坏最为彻底。

在 NSP 方面，CK 呈现具有丰富的短链和分支状结构(N-CK)；HWB 和 HEF 预处理下，短链和分支状结构的数量减少(N-HWB、N-HEF)，而 APPJ 预处理下，短链和分支结构已消失(N-APPJ)，进一步证实了 APPJ 预处理对果胶结构的显著降解作用。

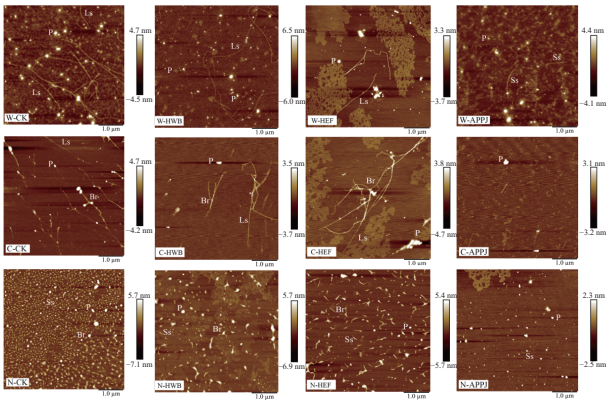



图 5　不同预处理方式对杏片果胶纳米结构的影响
Fig.5　Effect of different pretreatment treatments on the nanostructure of pectin in apricot fruit

注：水溶性果胶(W)、螯合果胶(C)、碱溶性果胶(N)、长链(Ls)、短链(Ss)、分支(Br)、聚集体(P)。

由此可知，APPJ 预处理明显降低了杏片果胶的链长和分支数量，导致细胞壁机械强度降低和细胞间粘结性减弱，从而加速果实软化。这一果胶结构的降解规律与果实硬度和干燥特性的变化趋势一致。Liu 等[30] 的研究也表明，质地坚硬的果实中果胶具有较长的链和丰富的分支结构。因此，APPJ 预处理通过显著破坏细胞壁和中胶层结构，致使果实硬度的降低。而细胞壁的孔隙度的增加，降低了水分迁移的阻力，从而显著提高了干燥速率，缩短了干燥时间。

## 2.5　不同预处理方式对杏片色泽及抑制酶促褐变的影响

表 4 所示，不同预处理对杏片色泽的影响呈现显著差异($P$<0.05)。所有预处理组的 Δ$E$ 值均显著高于 CK 组($P$<0.05)，说明各处理均造成了明显的色泽变化。其中，APPJ 处理组的 Δ$E$ 值最大(果皮 23.14，果肉 20.41)，表明其引起的色泽变化最为显著($P$<0.05)；HWB 处理次之(果皮 20.08，果肉 10.65)；HEF 处理的 Δ$E$ 值最小(果皮 6.99，果肉 4.42)，说明其色泽变化相对最不显著。

PPO 和 POD 是引起果蔬加工过程中组织褐变的关键酶类，它们的活性和热稳定性对果实的色泽和品质有重要影响。通常，PPO 和 POD 的活性被用于评价处理方式对果实褐变的抑制效果。从图 6 可知，CK 的杏片中 PPO 和 POD 的活性分别为 0.98 和 6.41 U/g，其中 POD 的活性显著高于 PPO($P$<0.05)。在不同的预处理方式下，PPO 和 POD 的活性均呈现下降趋势，但 PPO 的下降速率明显高于 POD，这表明杏片中 POD 的热稳定性高于 PPO。这一结果与 Deng等[24] 的研究结果一致。特别是 APPJ 预处理后的杏片中 PPO 和 POD 的含量明显低于其他处理方

表 4 不同预处理结合热泵干燥后杏片果皮与果肉色泽的变化

Table 4 Changes in the color of apricot slice peel and flesh after different pretreatments combined with heat pump drying

| 色泽参数 | CK | | HWB | | HEF | | APPJ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 果皮 | 果肉 | 果皮 | 果肉 | 果皮 | 果肉 | 果皮 | 果肉 |
| $L^*$ | 45.75±0.89$^{a}$ | 45.39±0.48$^{A}$ | 31.83±0.66$^{c}$ | 37.31±0.27$^{C}$ | 40.97±0.58$^{b}$ | 43.11±0.47$^{B}$ | 31.22±0.73$^{c}$ | 31.15±0.99$^{D}$ |
| $a^*$ | 11.87±0.42$^{c}$ | 17.46±1.31$^{A}$ | 13.18±0.83$^{bc}$ | 16.75±1.01$^{A}$ | 14.9±1.17$^{ab}$ | 18.2±1.33$^{A}$ | 15.56±0.45$^{a}$ | 17.34±0.24$^{A}$ |
| $b^*$ | 37.13±0.55$^{a}$ | 40.69±1.79$^{A}$ | 17.24±1.05$^{b}$ | 33.89±0.89$^{B}$ | 34.24±2.18$^{a}$ | 38.16±0.54$^{A}$ | 19.58±1.17$^{b}$ | 26.2±0.85$^{C}$ |
| $\Delta E$ | – | – | 20.08±3.69$^{a}$ | 10.65±0.95$^{B}$ | 6.99±1.17$^{b}$ | 4.42±1.41$^{C}$ | 23.14±0.95$^{a}$ | 20.41±1.79$^{A}$ |

注: 同行不同小写上标字母表示果皮数据差异显著($P$<0.05); 不同大写上标字母表示果肉数据差异显著($P$<0.05); “–”表示无数值。

式, 说明说 APPJ 预处理对这两种酶的钝化能力较强。

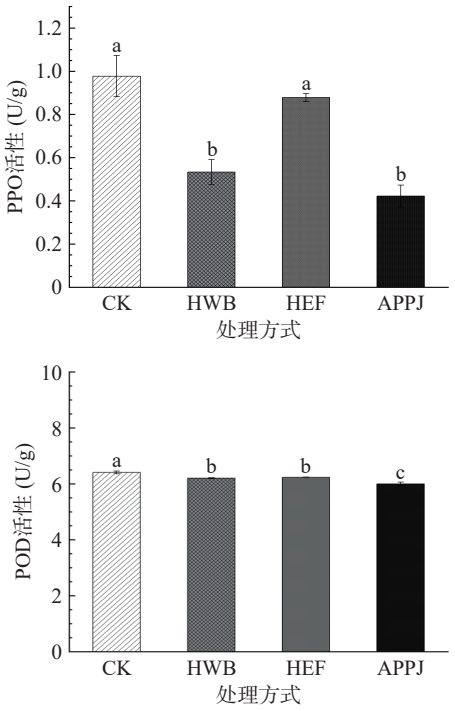



图 6 不同预处理方式对杏片酶促褐变关键酶活性的影响

Fig.6 Effects of different pretreatment methods on the activity of key enzymes involved in enzymatic browning of apricot slices

注: 不同小写英文字母表示数据差异显著, $P$<0.05。

综上所述, 各预处理方式均显著影响了杏片的色泽。所有处理组的 $L^*$和 $b^*$均低于对照组, 表明预处理结合热泵干燥后杏片色泽普遍变暗、黄色减弱。其中, APPJ 处理对褐变关键酶(PPO 和 POD)的钝化效果最强, Dong 等[42] 也报道了冷等离子体处理过程中酶失活的几种机制, 包括氧化和破坏蛋白质键, 自由基、紫外线光子、带电粒子和 DBD 等离子体产生的其他活性物质降低表面疏水性, 这些物质会改变 PPO 蛋白质的结构、稳定性和功能。所以可能是 APPJ 中的活性粒子(如自由基、臭氧等)与酶分子发生反应, 破坏其活性中心, 显著降低酶的催化能力, 抑制酶促褐变, 但并未因此获得更鲜亮的色泽, 这表明在热泵干燥过程中, 色泽的最终形成是酶促褐变与非酶褐变共同作用的结果。APPJ 处理虽然高效抑制了酶促褐变, 但其处理过程可能诱导了更显著的非酶褐变反应(如美拉德反应), 或对色素造成了直接破坏, 导致最终产品色泽加深。因此, APPJ 在抑制酶活方面优势突出, 但 HEF 预处理在保持杏片接近鲜果的亮黄色泽方面表现相对更好。

### 2.6 不同预处理方式对杏片抗氧化物质及抗氧化能力的影响

类胡萝卜素和酚类物质是杏片中重要的抗氧化活性成分。其中, 类胡萝卜素是主要呈色物质, 显著影响消费者的购买取向。新鲜杏片中的总酚和类胡萝卜素的含量分别为 64.84 和 18.25 mg/kg。由图 7 所示, 不同预处理方式对杏片的总酚和类胡萝卜素含量均有不同程度的增加, 其中 APPJ 预处理后的含量提升最为显著($P$<0.05), 增加了 172.18%。酚类物质通常储存于液泡中[43], 而类胡萝卜素则以与蛋白质形成的复合物或微晶体形式存在于色质体中[44]。预处理后总酚和类胡萝卜素含量的增加, 可能是由于细胞质膜结构被破坏, 使得这些物质更容易从细胞中释放并进入提取溶剂[45]。此外, APPJ 预处理通过其物理和化学作用, 可能进一步促进了细胞内物质的溶出。

CK 组杏片干燥后的总酚和类胡萝卜素的含量分别为 23.30 和 13.73 mg/kg, 与新鲜果实相比显著降低($P$<0.05), 说明干燥过程对这些活性物质的保留有一定影响。然而, 经 APPJ 预处理后的杏片中总酚和类胡萝卜素含量显著高于 CK($P$<0.05), 表明 APPJ 处理在一定程度上能够保护这些活性物质, 减少干燥过程中的损失。如图 7 所示, 预处理对杏片及其干燥后产品的抗氧化活性也具有显著影响。杏片的 FRAP 和 DPPH 自由基清除能力分别较 CK 分别提高了 37.50%~560.94% 和 46.67%~170.00%。表明预处理能够有效增强杏片的抗氧化能力。然而, 在未经预处理的新鲜杏片干燥过程中, 其 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 分别显著下降了 33.33% 和 73.44%($P$<0.05), 尤其是 FRAP 总抗氧化能力的降幅更为显著, 这种抗氧化活性的一方面是由于干燥过程中抗氧化活性物质(如酚类化合物和类胡萝卜素)的降解所致。另一方面, 经 APPJ 预处理的杏片在干燥后保留了最高的FRAP 和 DPPH 自由基清除能力。表明 APPJ 处理不仅在预处理阶段增强了抗氧化活性, 还在干燥过程中更好地保护了抗氧化活性物质, 减少了其降解。结合前文不同预处理方式对色泽变化及 PPO 和 POD活性变化的机制分析, APPJ 预处理通

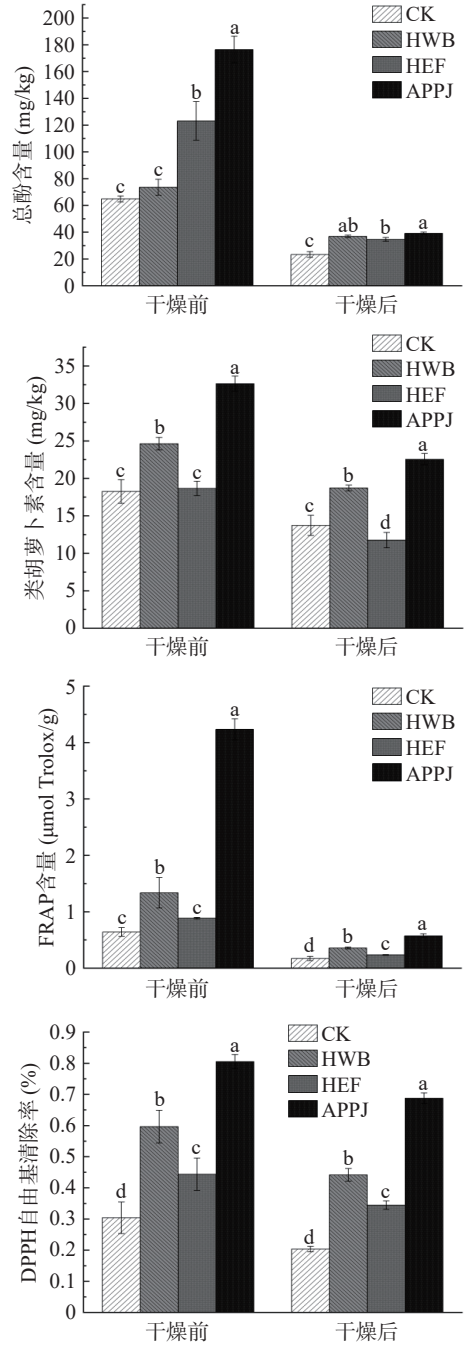



图 7　不同预处理方式对杏片抗氧化物质及抗氧化能力的影响

Fig.7　Effects of different pretreatment methods on antioxidant substances and antioxidant capacity of apricot slices

注：不同小写英文字母表示相同干燥时期数据差异显著，$P<0.05$。

过钝化 PPO 和 POD 活性，抑制了酶促褐变，从而更好地保持了杏片的色泽。同时，APPJ 预处理通过破坏细胞质膜结构，促进了总酚和类胡萝卜素的释放，并在干燥过程中更好地保护了这些活性物质，减少了其降解。因此，APPJ 预处理不仅显著提高了杏片的抗氧化能力，还通过抑制酶促褐变和保持色泽，进一步提升了杏片的品质特性。

因此，总酚和类胡萝卜素是杏果实中重要的抗氧化活性成分，其含量与抗氧化能力（FRAP 和 DPPH 自由基清除能力）密切相关。实验结果表明，APPJ 预处理不仅通过破坏细胞质膜结构促进了总酚和类胡萝卜素的释放，还在干燥过程中更好地保护了这些活性物质，减少了其降解。经 APPJ 预处理的杏片在干燥后表现出最高的 FRAP 和 DPPH 自由基清除能力，说明总酚和类胡萝卜素含量的增加是抗氧化活性提升的主要原因。相比之下，未经预处理的杏片在干燥过程中总酚和类胡萝卜素含量显著下降（$P<0.05$）导致其抗氧化活性大幅降低。由此可看出，总酚和类胡萝卜素含量的变化与 FRAP 和 DPPH 自由基清除能力之间存在直接的正相关关系，APPJ 预处理通过有效保护和提升这些活性物质的含量，显著增强了杏片的抗氧化能力，为开发高品质杏干产品提供了重要支持。

## 3　结论

本研究系统考察了热漂烫（HWB）、高压静电场（HEF）和低温等离子体（APPJ）预处理对赛买提杏片热泵干燥特性和品质的影响。结果表明，三种预处理方式均能改善干燥特性，其中 APPJ 预处理效果最为显著，可缩短干燥时间 35.29%，破坏细胞壁结构（增加 WSP 含量 17.84%，降低 CSP 和 NSP 含量 7.89% 和 2.53%），减小水分迁移阻力。此外，APPJ 预处理能显著提升产品品质，包括抑制酶促褐变（钝化 PPO 和 POD 活性）、促进总酚和类胡萝卜素释放，并提高抗氧化活性（DPPH 自由基清除率提升）。相比于 HWB 和 HEF，APPJ 具有处理时间短、能耗低、无化学残留等优势，可以适用于鲜果干燥前的预处理。但 APPJ 预处理的大规模工业化应用仍需进一步优化工艺参数和评估其经济效益。与此同时，不同等离子体发生方式及处理条件对产品品质提升和风味物质的影响作用机制还有待进一步研究。

© 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］ ZHANG Xinchen, TAO Ningping, WANG Xichang, et al. The colorants, antioxidants, and toxicants from nonenzymatic browning reactions and the impacts of dietary polyphenols on their thermal formation[J]. Food & Function, 2015, 6(2): 345−355.

［2］ de MARCO I, IANNONE R. Production, packaging and preservation of semi-finished apricots: A comparative life cycle assessment study[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 106−117.

［3］ 韩雅如, 孙佳莹, 宋方圆, 等. 壳聚糖-咖啡酸处理对'赛买提'杏贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(5): 15−23. ［HAN Yaru, SUN Jiaying, SONG Fangyuan, et al. Effect of chitosan-caffeic acid treatment on storage quality of 'Saimaiti' apricot[J]. Storage and Process, 2025, 25(5): 15−23.］

［4］ 张艳亭, 王文亮, 杨正友, 等. 新型节能干燥技术在果蔬加工中的应用及研究热点分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(24): 387−396. ［ZHANG Y T, WANG W L, YANG Z Y, et al. Applica-

tion and research hotspots of novel energy-saving drying technologies in fruit and vegetable processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(24): 387−396. ]
[ 5 ] 张派伟, 张振迎, 武雨萌, 等. 热泵干燥技术的应用现状及展望[J]. 化学工程, 2024, 52(6): 40−46. [ ZHANG P W, ZHANG Z Y, WU Y M, et al. Application status and prospects of heat pump drying technology[J]. Chemical Engineering, 2024, 52(6): 40−46. ]
[ 6 ] 宛胜, 周绪霞, 丁玉庭, 等. 冷等离子体协同处理对热泵干制贻贝贮藏品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1−10[2024-12-31]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043059. [ WAN S, ZHOU X X, DING Y T, et al. Effect of cold plasma combined treatment on storage quality of heat pump-dried mussels[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1−10[2024-12-31]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043059. ]
[ 7 ] MARTÍN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R, ELEZ-MARTíNEZ P, et al. Food safety management[M]. San Diego: Academic Press, 2014: 443−465.
[ 8 ] 刘静, 赵亚, 石启龙. 果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究进展及未来展望[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 32−42. [ LIU Jing, ZHAO Ya, SHI Qilong. Research progress and future prospects of novel drying pretreatment technologies for fruits, vegetables, and aquatic products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 32−42. ]
[ 9 ] VARGAS L, KAPOOR R, NEMZER B, et al. Application of different drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of broccoli, kale, and spinach[J]. LWT, 2022, 155: 112892.
[ 10 ] ZHAO Yunfeng, ZHENG Ruisheng. Combination of fruit and vegetable storage and fresh-keeping with postharvest heat treatment[J]. Journal of Chemistry, 2022, 2022: 8681499.
[ 11 ] XIAO Hongwei, PAN Zhongli, DENG Lizhen, et al. Recent developments and trends in thermal blanching–A comprehensive review[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101−127.
[ 12 ] VIDYARTHI S K, EL-MASHAD H M, KHIR R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 224−231.
[ 13 ] DUTTA B, RAGHAVAN G S V, DEV S R S, et al. A comparative study on the effects of microwave and high electric field pretreatments on drying kinetics and quality of mushrooms[J]. Drying Technology, 2012, 30(8): 891−897.
[ 14 ] ÇAKMAK R Ş, TEKEOĞLU O, BOZKIR H, et al. Effects of electrical and sonication pretreatments on the drying rate and quality of mushrooms[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 69: 197−202.
[ 15 ] BAYATI M, LUND M N, TIWARI B K, et al. Chemical and physical changes induced by cold plasma treatment of foods: A critical review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(4): e13376.
[ 16 ] WU Wenfu, JIN Xing, LIU Zhe, et al. Effect of low temperature plasma pretreatment on drying process of vegetables with waxy layer[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(12): e13911.
[ 17 ] 伊丽达娜·开赛尔, 白羽嘉, 郑丽萍, 等. 杏果脯预处理的烫漂与护色工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(24): 107−114. [ YILIDANA K, BAI Y J, ZHENG L P, et al. Optimization of blanching and color protection processes for pretreatment of preserved apricots[J]. Food Research and Development, 2023, 44(24): 107−114. ]
[ 18 ] 承春平. 不同预处理下切分杏热风干燥特性及相关品质研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. [ CHENG C P. Study on hot-air drying characteristics and related quality of sliced apricots under different pretreatments[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. ]
[ 19 ] 赵以雪. 高压静电场对圣女果保鲜效果的影响研究及试验装置的优化设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. [ ZHAO Y X. Effect of high-voltage electrostatic field on cherry tomato preservation and experimental device design[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. ]
[ 20 ] DU Yuhang, WANG Huihui, YUAN Shaofeng, et al. Dielectric barrier discharge plasma pretreatment: A cleaner new way to improve energy efficiency and quality of wolfberry drying[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141951.
[ 21 ] 王庆惠, 杨嘉鹏, 杨忠强. 基于 Box-Behnken 响应面法优化杏子干燥工艺[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(11): 2103−2110. [ WANG Q H, YANG J P, YANG Z Q. Optimization of apricot drying process based on Box-Behnken response surface methodology[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(11): 2103−2110. ]
[ 22 ] 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318−323. [ XIAO H W, ZHANG S X, BAI J W, et al. Drying characteristics of apricots using gas jet impingement technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 318−323. ]
[ 23 ] 冯怡婷, 秦毅臻, 刘炯娜, 等. 版纳甜龙竹笋热泵干燥特性及动力学模型[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 72−88. [ FENG Y T, QIN Y Z, LIU J N, et al. Heat pump drying characteristics and kinetic model of Banna sweet dragon bamboo shoots[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 72−88. ]
[ 24 ] DENG Lizhen, MUJUMDAR A S, YANG Xuhai, et al. High humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying rate and softens texture of apricot *via* cell wall pectin polysaccharides degradation and ultrastructure modification[J]. Food Chemistry, 2018, 261: 292−300.
[ 25 ] SHAO Xiaolong, LI Yunfei. Application of low-field NMR to analyze water characteristics and predict unfrozen water in blanched sweet corn[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(6): 1593−1599.
[ 26 ] 张萌. 复合酶处理对枸杞细胞壁结构及果浆品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. [ ZHANG M. Effect of compound enzyme treatment on cell wall structure and pulp quality of wolfberry[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022. ]
[ 27 ] YU Qingting, LI Xuan, HU Jiaxing, et al. The effect of three pectin fractions variation on the browning of different dried apple products[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108052.
[ 28 ] 赵邯, 项可心, 刘春菊, 等. 不同品种桃果实化学组分、微观结构与质地的关系[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(12): 2705−2718. [ ZHAO H, XIANG K X, LIU C J, et al. Relationship between chemical composition, microstructure and texture properties of different peach varieties[J]. Zhejiang Journal of Agricultural Sciences, 2024, 36(12): 2705−2718. ]
[ 29 ] ZHANG Huan, GUAN Qi, ZENG Pei, et al. Ultrasensitive detection of pectin based on the decarboxylation reaction and surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Analytical Methods, 2022, 14(23): 2266−2276.
[ 30 ] LIU Hui, CHEN Fusheng, LAI Shaojuan, et al. Effects of calcium treatment and low temperature storage on cell wall polysaccharide nanostructures and quality of postharvest apricot (*Prunus arme-*

*niaca*)[J]. Food Chemistry, 2017, 225: 87−97.
[31] 杨梓婷, 徐润东, 畅莹莹, 等. 藜麦饭常温贮藏过程中品质特性与风味成分的变化[J]. 食品工业科技, 2025(23): 363−370. [YANG Ziting, XU Rundong, CHANG Yingying, et al. Changes in quality characteristics and flavor components of quinoa rice during ambient storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025(23): 363−370.]
[32] 陈煜荧, 马晓丽, 石萌琪. 热风干燥温度对山楂粉品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 110−115. [CHEN Yuying, MA Xiaoli, SHI Mengqi. Effect of hot air drying temperature on the quality of hawthorn powder[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 110−115.]
[33] SAKOOEI-VAYGHAN R, PEIGHAMBARDOUST S H, HESARI J, et al. Effects of osmotic dehydration (with and without sonication) and pectin-based coating pretreatments on functional properties and color of hot-air dried apricot cubes[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125978.
[34] 娄世豪, 孙小晶, 李丹丹, 等. 干燥方式对山楂总黄酮含量及抗氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 121−129. [LOU Shihao, SUN Xiaojing, LI Dandan, et al. Effects of drying methods on total flavonoid content and antioxidant properties of hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 121−129.]
[35] JIANG Dalong, WANG Qinghui, HUANG Chu, et al. Effect of various different pretreatment methods on infrared combined hot air impingement drying behavior and physicochemical properties of strawberry slices[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101299.
[36] WANG Jun, MU Weisong, FANG Xiaoming, et al. Pulsed vacuum drying of Thompson seedless grape: Effects of berry ripeness on physicochemical properties and drying characteristic[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 106: 117−126.
[37] WANG Xueqing, ZHONG Jinghan, HAN Meng, et al. Drying characteristics and moisture migration of ultrasound enhanced heat pump drying on carrot[J]. Heat and Mass Transfer, 2023, 59(12): 2255−2266.
[38] WANG Lin, XU Baoguo, WEI Benxi, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 619−628.
[39] WANG J, PEI YU P, CHEN C, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying behavior of red pepper via altering cellular structure, pectin profile and water state[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2023, 83.
[40] WANG Jun, PEI Yupeng, CHEN Chang, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying behavior of red pepper *via* altering cellular structure, pectin profile and water state[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103246.
[41] ELLA MISSANG C, MAINGONNAT J F, RENARD C M G C, et al. Apricot cell wall composition: Relation with the intra-fruit texture heterogeneity and impact of cooking[J]. Food Chemistry, 2012, 133(1): 45−54.
[42] DONG Shanshan, FAN Liumin, MA Yunfang, et al. Inactivation of polyphenol oxidase by dielectric barrier discharge (DBD) plasma: Kinetics and mechanisms[J]. LWT, 2021, 145: 111322.
[43] 朱丹实. 葡萄采后软化机制及风味劣变的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014. [ZHU D S. Study on postharvest softening mechanism and flavor deterioration of grapes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014.]
[44] SHI J, Le MAGUER M. Lycopene in tomatoes: Chemical and physical properties affected by food processing[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2000, 20(4): 293−334.
[45] HUANG Wenshu, FENG Zuoshan, AILA R, et al. Effect of pulsed electric fields (PEF) on physico-chemical properties, *β*-carotene and antioxidant activity of air-dried apricots[J]. Food Chemistry, 2019, 291: 253−262.