



不同超声波联合预处理对八角微波干燥效率及品质的影响

吴钊龙¹, 黄成玉², 李世佑³, 邱展鸿⁴, 师德强^{5*}, 覃海波¹, 廖宏泽⁶, 李秉正¹

(¹广西科学院/广西微波先进制造技术重点实验室, 广西南宁 530007; ²云南众木农林发展有限公司/云南八角产业研究院有限公司, 云南文山 663400; ³南宁学院食品与质量工程学院, 广西南宁 530200; ⁴广西华泰药业有限公司, 广西贺州 546800; ⁵广西科学院广西海洋科学院/广西水产生物技术与现代生态养殖重点实验室/广西渔业重大疫病防控与高效健康养殖产业技术工程研究中心, 广西南宁 530007; ⁶广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西南宁 530006)

摘要:【目的】探究不同超声波联合预处理对八角微波干燥效率及干制品品质的影响,明确最优预处理方式及其作用机制,为八角绿色、高效、节能干燥加工提供参考依据。【方法】以新鲜八角为原料,设超声波(US)、超声波联合蒸汽漂烫(US-SB)及超声波联合冻融(US-FT)3种预处理方式,以不经任何预处理直接进行微波干燥为对照(CK),系统分析3种预处理对八角微波干燥特性、理化品质及抗氧化活性的影响,并结合微观结构与低场核磁共振技术揭示其作用机制。【结果】3种预处理均能破坏八角细胞结构,增加水分迁移通道。与CK组[干燥时间261.67 min,单位能耗14.60 (kW·h)/kg]相比,US、US-SB和US-FT组干燥时间分别缩短8.92%、46.50%和32.48%,单位能耗分别降低13.08%、50.00%和33.56%。US-SB组干燥效率最高,但其多酚氧化酶(PPO)活性几乎被完全钝化,导致干制品红度值(a^*)与CK组无显著差异($P>0.05$,下同),且挥发油含量(6.59%)、莽草酸含量(8.20%)及1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除率(53.95%)均显著低于CK组($P<0.05$,下同)。US组和US-FT组PPO活性显著高于CK组, a^* 较CK组分别显著提高15.74%和15.64%,色泽更红亮,DPPH自由基清除率较CK组分别显著提高22.28%和25.53%,而挥发油和莽草酸含量与CK组无显著差异。US-FT组体积收缩率(41.88%)与CK组无显著差异,而US组(45.78%)和US-SB组(54.18%)显著提高。低场核磁共振分析结果显示,US和US-FT预处理增加八角自由水峰面积,促进水分迁移;US-SB预处理则导致自由水减少、不易流动水增加。相关分析结果显示, a^* 与DPPH自由基清除率呈极显著正相关($P<0.01$,下同),体积收缩率与挥发油含量、莽草酸含量及DPPH自由基清除率呈极显著负相关。【结论】综合干燥效率与产品品质,超声波联合冻融预处理效果最优,可在缩短干燥时间、降低能耗的同时,改善八角色泽,有效保留挥发油、莽草酸及抗氧化活性,且不增加体积收缩率。该技术为八角绿色干燥加工提供了可行方案。

关键词:八角; 预处理; 微波干燥; 理化性质; 抗氧化活性

中图分类号:S573.909.2

文献标志码:A

文章编号:2095-1191(2026)06-1830-13

Effects of different ultrasound-combined pretreatments on microwave drying efficiency and quality of star anise

WU Zhao-long¹, HUANG Cheng-yu², LI Shi-you³, QIU Zhan-hong⁴, SHI De-qiang^{5*},
QIN Hai-bo¹, LIAO Hong-ze⁶, LI Bing-zheng¹

(¹Guangxi Academy of Sciences/Guangxi Key Laboratory of Advanced Microwave Manufacturing Technology, Nanning, Guangxi 530007, China; ²Yunnan Zhongmu Agriculture and Forestry Development Co., Ltd./Yunnan Star Anise Industry Research Institute Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663400, China; ³College of Food and Quality Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi 530200, China; ⁴Guangxi Huatai Pharmaceutical Co., Ltd., Hezhou, Guangxi 546800, China; ⁵Guangxi Academy of Marine Sciences, Guangxi Academy of Sciences/Guangxi Key Laboratory of

收稿日期:2026-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32373175);广西自然科学基金项目(2025GXNSFBA069267);广西科技基地和人才专项(桂科AD23026033);广西微波先进制造技术重点实验室开放课题(2025GXKLAMMT02)

通信作者:师德强(1982-), <https://orcid.org/0009-0002-4601-8452>,高级工程师,主要从事生物工程及农产品加工研究工作,E-mail: shiyu611@163.com

第一作者:吴钊龙(1995-), <https://orcid.org/0000-0002-3792-3728>,主要从事农产品加工研究工作,E-mail: wuzhaolong@gxas.cn

Aquatic Biotechnology and Modern Ecological Aquaculture/Guangxi Engineering Research Center for Fishery Major Diseases Control and Efficient Healthy Breeding Industrial Technology, Nanning, Guangxi 530007, China; ⁶School of Marine Sciences and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi 530006, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of different ultrasound-combined pretreatments on the microwave drying efficiency and dried product quality of star anise, identify the optimal pretreatment method and its underlying mechanism, and thereby provide reference for the green, efficient, and energy-saving drying processing of star anise. [Method] Fresh star anise was subjected to three pretreatments as raw materials: ultrasound (US), ultrasound combined with steam blanching (US-SB), and ultrasound combined with freeze-thaw treatment (US-FT), with samples directly subjected to microwave drying without pretreatment served as the control (CK). Effects of the three pretreatments on the microwave drying characteristics, physicochemical quality, and antioxidant activity of star anise were systematically analyzed, and the underlying mechanisms were further elucidated through microstructural observation and low-field nuclear magnetic resonance analysis. [Result] All three pretreatments disrupted the cellular structure of star anise and increased the number of water-migration pathways. Compared with the CK group [drying time of 261.67 min and specific energy consumption of 14.60 (kW·h)/kg], the drying times of the US, US-SB, and US-FT groups were reduced by 8.92%, 46.50%, and 32.48% respectively, while their specific energy consumptions decreased by 13.08%, 50.00%, and 33.56% respectively. The US-SB group exhibited the highest drying efficiency. However, polyphenol oxidase (PPO) activity was almost completely inactivated, resulting in no significant difference in the redness value (a^*) of dried product compared with the CK group ($P>0.05$, the same below). Moreover, its volatile oil content (6.59%), shikimic acid content (8.20%), and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rate (53.95%) were significantly lower than those of the CK group ($P<0.05$, the same below). PPO activity in the US and US-FT groups was significantly higher than that in the CK group, and the a^* values significantly increased by 15.74% and 15.64% compared with CK group respectively, demonstrating a brighter red color; the DPPH radical scavenging rates increased significantly by 22.28% and 25.53% compared with CK group respectively; no significant differences in volatile oil or shikimic acid contents were observed between these two groups and the CK group. The volume shrinkage rate of US-FT group (41.88%) showed no significant difference with the CK group, whereas those of the US (45.78%) and US-SB (54.18%) groups were significantly increased. Low-field nuclear magnetic resonance analysis showed that the US and US-FT pretreatments increased the free water peak area and promoted water migration, whereas the US-SB pretreatment reduced free water and increased immobilized water. Correlation analysis revealed that a^* had an extremely significant positive correlation with the DPPH radical scavenging rate ($P<0.01$, the same below), while the volume shrinkage rate showed extremely significant negative correlations with volatile oil content, shikimic acid content, and DPPH radical scavenging rate. [Conclusion] Considering both drying efficiency and product quality, ultrasound combined with freeze-thaw pretreatment exhibits the best overall performance, which can shorten drying time, reduce energy consumption, improve star anise color, effectively retain volatile oil, shikimic acid, and antioxidant activity, without increasing volume shrinkage ratio. This technology provides a feasible approach for the green drying and processing of star anise.

Key words: star anise; pretreatment; microwave drying; physicochemical properties; antioxidant activity

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (32373175); Guangxi Natural Science Foundation (2025GXNSFBA069267); Guangxi Science and Technology Base and Talent Special Project (Guike AD230 26033); Opening Project of Guangxi Key Laboratory of Advanced Microwave Manufacturing Technology (2025 GXKLAMMT02)

0 引言

【研究意义】八角 (*Illicium verum* Hook. f.) 是一种兼具经济、食用和药用价值的重要香辛料 (Xu et al., 2023; Zou et al., 2023; 王乙淋等, 2024; 陈赛赛等, 2025; 郭向阳, 2025), 我国南方地区产量占全国 80% 以上。新鲜八角采收时湿基含水量高达 75% 左右, 采收后若不及时干燥, 易发生黑化、霉变及有效成分流失, 从而导致严重的采后损失 (Ding et al., 2020)。干燥是保障八角品质的关键加工环节。传统自然晾晒与热风干燥虽应用广泛, 但存在干燥时间长、产品品质不稳定和香气损失大等问题 (Zhang et al., 2025b)。部分从业者甚至违规使用硫磺熏蒸

等不当加工方式, 严重影响了八角的食用安全与产业升级 (Wu et al., 2026)。因此, 研发绿色、高效、安全的八角干燥技术具有现实紧迫性。【前人研究进展】近年来, 不少学者围绕八角干燥技术开展了较多研究, 旨在寻找替代传统自然晾晒和热风干燥的高效方法。微波干燥因加热迅速、节能环保、易于控制等优势, 已在八角及其他药食同源植物干燥中受到关注。吴钊龙等 (2022) 研究表明, 间歇微波干燥可显著缩短黄精片干燥时间, 但单一微波处理易导致局部过热和品质劣变。李晨曦 (2023) 优化八角微波热泵联合干燥工艺, 指出单一微波干燥存在有效成分损失较大、色泽不均等问题, 仅依靠微波技术难以兼顾高效干燥与品质保持。Wu 等 (2026) 比较自然

晾晒、热风干燥、真空冷冻干燥、红外干燥和微波干燥对八角品质的影响,发现微波干燥效率最高,但对挥发油的保留效果不如真空冷冻干燥和热风干燥。为了改善干燥效果,引入适宜的预处理技术成为提升微波干燥效率和产品品质的有效策略。在八角加工中,杀青(漂烫)通常被视为干燥前或干燥初期的重要预处理环节,其主要目的在于通过短时热处理或物理作用破坏细胞膜结构、促进水分迁移及调控多酚氧化酶(PPO)等重要酶活性,从而改善干制品色泽并提高干燥效率(Zhang et al., 2026)。金建龙等(2021)以热风温度和杀青/不杀青为变量研究八角热风干燥过程,发现杀青处理可缩短干燥时间,改善干制八角色泽和复水性,但同时会增加皱缩率。Zhang等(2025b)指出,漂烫后干燥是八角加工中延长货架期和利于挥发油提取的重要策略,但不适宜的热处理可能造成挥发油损失、水溶性活性成分溶出及组织结构塌陷。由此可见,八角杀青效果不仅取决于酶失活程度,还与细胞结构破坏、水分迁移、色泽形成及活性成分保留等密切相关。Zhang等(2020)、仇徐亮等(2024)、Wang等(2024)研究发现,超声波等非热预处理能够保护热敏性成分,却难以显著提升干燥效率。宫许林(2023)研究不同预处理(烫漂、冻融、超声波)对八角热风干燥特性的影响,发现冻融预处理可提高干燥速率,但对八角的色泽改善有限,烫漂预处理虽能钝化酶活性,但导致部分香气成分损失。Zhang等(2026)系统比较了热/非热预处理对八角干燥品质的调控作用,指出热烫处理可抑制酶促褐变,但会造成水溶性莽草酸溶出。超声波、冻融等非热预处理虽不同于传统高温杀青,但可通过空化效应、机械振动或冰晶破坏等方式改变八角细胞结构,提高组织通透性并促进水分扩散,因此也可能产生一定的“类杀青”效果。Zhang等(2025a)比较了超声辅助电解水解冻、超声辅助去离子水解冻、热水漂烫等预处理方式对八角干燥效果的影响,结果发现,超声辅助电解水解冻可通过增强细胞结构破坏、促进水分迁移并调控PPO和过氧化物酶(POD)活性,缩短干燥时间,同时促进八角色泽形成和特征香气成分释放。近年来,联合预处理策略因兼具不同技术优势而受到广泛关注。已有研究表明,超声波联合冻融可实现紫甘蓝脆片的快速脱水 and 品质改善(虎鑫等, 2025),超声波联合漂烫能够显著提高辣椒干燥效率并促进活性成分保留(曹玉丹等, 2026)。【本研究切入点】目前,虽然已有超声波、冻融、漂烫等预处理在八角干燥中应用的相关研究,但将超声波分别与蒸汽漂烫、冻融联合应用于八

角微波干燥的研究尚未见详细报道,其对八角水分含量及分布、微观结构、有效成分含量及抗氧化活性的影响尚不明确,作用机制亟待阐明。【拟解决的关键问题】比较超声波、超声波联合蒸汽漂烫及超声波联合冻融3种预处理方式对八角微波干燥特性、理化品质及抗氧化活性的影响,并结合低场核磁共振技术与微观结构分析揭示其内在机制,以期为八角绿色、高效、节能干燥加工提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜八角由广西藤县古龙镇泗洲村八角种植基地提供,挑选大小均匀、色泽一致、成熟度相同的八角,清洗干净后备用。采用水分测定仪测得新鲜八角的初始湿基平均含水量为75.60%。

主要试剂:邻苯二酚、磷酸盐缓冲液(国药集团化学试剂有限公司);聚乙烯吡咯烷酮(上海麦克林生化科技股份有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除能力检测试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)。主要仪器设备:Webox-A6型微波干燥机(株洲市微朗科技有限公司)、JG-28K20超声波清洗仪(浙江九工环保设备有限公司)、NMI20型核磁共振成像分析仪(上海纽迈电子科技有限公司)、1510型全波长酶标仪(美国ThermoFisher Scientific公司)、CR-10Plus型彩色色差计(日本柯尼卡美能达公司)、XSP-BM-3CB型光学显微镜(上海彼爱姆光学仪器制造有限公司)、S-3400N扫描电镜(日本Hitachi公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 预处理方法 根据前期预试验的优化结果,设超声波(US)、超声波联合蒸汽漂烫(US-SB)、超声波联合冻融(US-FT)3个预处理组和1个对照(CK)组。各组别的具体操作流程如下:CK组精确称取500 g八角样品,不经任何预处理直接进行微波干燥;US组精确称取500 g八角样品,置于超声波仪器中,在400 W、40 kHz的条件下处理20 min;US-SB组将经US预处理后的八角样品置于100 °C蒸锅中进行蒸汽漂烫处理10 min,结束后在室温环境中自然冷却至室温;US-FT组将经US预处理后的八角样品放入冷冻柜中,在-20 °C条件下冷冻24 h,结束后在室温环境中自然解冻至室温。

1.2.2 干燥试验 将经CK、US、US-SB及US-FT预处理后的八角样品分别均匀平铺于微波干燥托盘上,单层不重叠为原则,铺放厚度控制在1.5~2.0 cm。预试验结果表明,功率密度过低会导致干燥时间延

长、能耗增加,功率密度过高则易造成局部过热、色泽劣变及挥发性成分损失;综合干燥效率与品质保持效果,微波功率密度设定为0.9 W/g。干燥设备运行过程中采用设备自带转盘旋转方式进行加热,干燥过程中每隔20 min取样称重,直至八角的干基含水量 ≤ 0.13 g/g结束干燥,试验重复3次。

1.2.3 微观结构测定

1.2.3.1 光学显微镜观察 将预处理后的新鲜八角切为1 mm×1 mm小方块,取约0.5 mm切片,用0.05%甲苯胺蓝染色10 min,于10倍光学显微镜下观察,分析细胞结构变化。

1.2.3.2 扫描电子显微镜观察 将干燥后的八角样品切成1 mm×1 mm小方块,采用扫描电子显微镜进行观察。样品固定于覆有一层导电胶的样品台上,轻轻按压确保黏附牢固;随后对样品进行喷金处理,在8.0 kV加速电压、350倍放大条件下观察(Liu et al., 2025)。

1.2.4 PPO活性测定 参照Zhang等(2026)的方法测定八角PPO活性。

1.2.5 干基含水量 采用GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定八角干基含水量,并根据公式进行计算:

$$M = \frac{m_t - m}{m}$$

式中, M 为八角干基含水量(g/g), m_t 为干燥至 t 时刻的八角质量(g), m 为八角干物质质量(g)。

1.2.6 干燥速率 根据公式计算八角的干燥速率(吴钊龙等,2023):

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}$$

式中, DR 为干燥速率[g/(g·min)], Δt 为时间间隔(min), M_t 和 $M_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t+\Delta t$ 时刻的八角干基含水量(g/g)。

1.2.7 单位能耗 以去除1 kg八角水分所消耗的电能表示,单位为(kW·h)/kg,由电能表测定(黄纪民等,2023)。

1.3 低场核磁共振分析

1.3.1 横向弛豫时间(T_2)的采集及反演 将干燥过程的八角放入低场核磁共振仪专用玻璃试管中,并用CPMG脉冲序列测定 T_2 ,序列参数根据盘喻颜等(2021)的方法稍作修改,设为采集次数6次、回波数16000、回波时间0.2 ms。通过CPMG脉冲序列反演得到 T_2 谱图,对各峰面积进行统计。

1.3.2 核磁共振成像(MRI)参数设定 MRI参数根据盘喻颜等(2021)的方法稍作修改,主频 $SF_1=22$

MHz,偏移频率 $O_1=366645.85$ Hz,90°脉冲宽度 $P_1=3200$ μ s,180°脉冲宽度 $P_2=3200$ μ s。

1.4 八角品质评价

1.4.1 色泽测定 将不同预处理后的八角干制品粉碎,采用色差计测定明度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)3项颜色指标(覃海波等,2025)。

1.4.2 体积收缩率计算 采用小米置换法测定八角体积,置换介质为小米,根据公式计算体积收缩率(林芳等,2025):

$$SR = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100$$

公式中, SR 为体积收缩率(%), V_0 为新鲜八角体积(mm^3), V_t 为干燥后八角体积(mm^3)。

1.4.3 挥发油含量测定 参照Shi等(2021)的方法并略作修改进行测定,根据公式计算八角挥发油含量:

$$VO = \frac{m_1}{m_2} \times 100$$

公式中, VO 为八角挥发油含量(%), m_1 为提取所得挥发油质量(g), m_2 为用于提取的八角质量(g)。

1.4.4 莽草酸含量测定 参照Shi等(2021)的方法并略作修改进行测定。称取4.0 g干燥八角,加入200 mL去离子水,置于电热板上缓慢加热至沸腾;随后调小火力保持微回流5 h,直至接收器中挥发油体积不再增加,停止加热。蒸馏结束后,将收集的八角挥发油与烧瓶中的水提液一并转移,用去离子水定容至250 mL。精确移取1 mL上述溶液至100 mL容量瓶中,用去离子水定容至刻度;再吸取1 mL该稀释液至10 mL容量瓶中,用甲醇定容至刻度。采用酶标仪于213 nm波长下测定最终溶液的吸光度。测定前,溶液经0.45 μ m滤膜过滤,收集滤液作为待测样液,根据公式计算八角莽草酸含量:

$$SA = \frac{c \times v \times k}{1000m} \times 100$$

公式中, SA 为莽草酸含量(%), c 为莽草酸质量浓度($\mu\text{g/mL}$), v 为提取液体积(mL), k 为稀释倍数, m 为称取的八角质量(g)。

1.4.5 DPPH自由基清除能力测定 采用试剂盒测定八角的DPPH自由基清除能力。

1.5 统计分析

每组试验设3次重复,采用SPSS 17.0进行数据统计分析,通过单因素方差分析(One-way ANOVA)结合邓肯多重极差检验比较各组间的差异显著性,采用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 预处理对微波干燥八角微观结构的影响

光学显微镜观察结果(图1)显示,CK组八角细胞壁与细胞膜结构完整,细胞排列整齐、轮廓清晰可辨,未受外界物理或化学因素的破坏;US预处理后八角细胞结构出现轻微变形;US-SB和US-FT预处理对细胞结构损伤更为明显,其中US-SB预处理导致细胞严重变形、塌陷,US-FT预处理后细胞虽发生明显变形,但损伤程度相对较轻,细胞结构完整性优于US-SB组。

扫描电子显微镜观察结果(图2)显示,US预处理后细胞孔隙数量增加,孔径明显增大,US-SB和US-FT预处理均导致细胞结构不同程度破损。上述结构变化有利于形成更多的水分迁移通道,为后续水分快速扩散和脱除提供结构基础。

2.2 预处理对微波干燥八角PPO活性的影响

为了阐明八角色泽形成与氧化反应相关的酶学机制,测定PPO活性。由图3可知,不同预处理组八角的PPO活性存在显著差异($P < 0.05$,下同),US组和US-FT组PPO活性分别为270.67和209.33 U/(mL·min),较CK组分别显著提高111.46%和63.54%;US-SB组PPO活性接近0 U/(mL·min),几乎完全被钝化,显著低于其他各组。

2.3 预处理对微波干燥八角干燥时间及单位能耗的影响

由图4可知,与CK组相比,各预处理组八角的干燥时间与单位能耗均显著降低。CK组干燥时间为261.67 min,单位能耗为14.60 (kW·h)/kg;与CK组相比,US组干燥时间缩短8.92%,单位能耗降低13.08%;US-SB组干燥时间缩短46.50%,单位能耗降低50.00%;US-FT组干燥时间缩短32.48%,单位能耗降低33.56%。

2.4 预处理对微波干燥八角干燥特性的影响

如图5-A所示,各预处理组的干燥曲线较CK组更为陡峭,其中US-SB组下降速度最快,US-FT组次之。由图5-B可知,八角的干燥过程仅包含加速和降速2个阶段,且以降速阶段为主导。此外,各预处理组的初始干基含水量与CK组相比存在差异,CK组初始干基含水量为3.10 g/g,US组和US-FT组分别增至3.44和3.12 g/g,而US-SB组降至2.89 g/g。

2.5 不同预处理对八角 T_2 反演谱的影响

由图6和表1可知,不同预处理条件下八角的低场核磁共振 T_2 反演谱均存在4个明显的弛豫峰: T_{21} (0.14~0.32 ms)、 T_{22} (1.98~5.47 ms)、 T_{23} (16.23~55.18 ms)和 T_{24} (345.82~1258.32 ms),分别对应结合水、不易流动水、自由水、油脂相关质子的弛豫峰面积分别记为

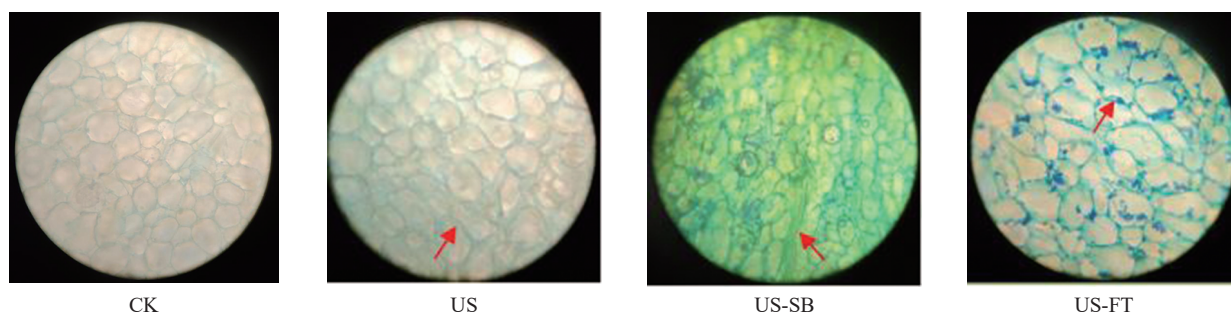


图1 不同预处理的八角微观结构变化(10×)

Fig. 1 Change in microstructure of star anise under different pretreatments (10×)

红色箭头表示预处理后八角细胞结构发生变化(细胞壁/细胞膜变形及塌陷)的位置

Red arrows represented positions with changes in cell structure of star anise (deformation and collapse of cell wall/cell membrane)

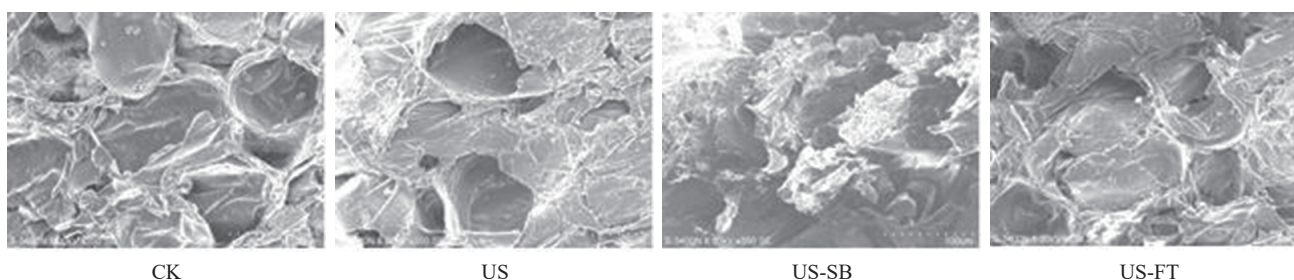


图2 不同预处理的八角扫描电子显微镜图像(350×)

Fig. 2 Scanning electron microscope images of star anise under different pretreatments (350×)

A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 和 A_{24} 与 CK 组相比,各预处理组八角的弛豫峰位置均发生明显移动;US 组和 US-FT 组的各峰整体右移, A_{23} 显著增大;相比之下,US-SB 组八角的弛豫峰则呈现向左移动的趋势, A_{23} 减小, A_{22} 则显著增大。各组之间 A_{21} 无显著差异 ($P>0.05$,下同)。

2.6 不同预处理的八角干燥过程中水分存在形式变化规律

由图7可知,不同预处理条件下,八角在干燥过程中的 T_2 曲线变化趋势基本一致。随着干燥时间的延长,各预处理组的反演谱均出现不同程度的左移。其中, T_{23} 和 T_{24} 对应的信号幅值下降, T_{22} 信号幅值呈先升高后下降的变化趋势, T_{21} 的信号幅值变化幅度极小。与 CK 组相比,各预处理组八角的信号幅值下降速度更快,反演谱图左移的速率更为明显,其中 US-SB 组变化最明显。

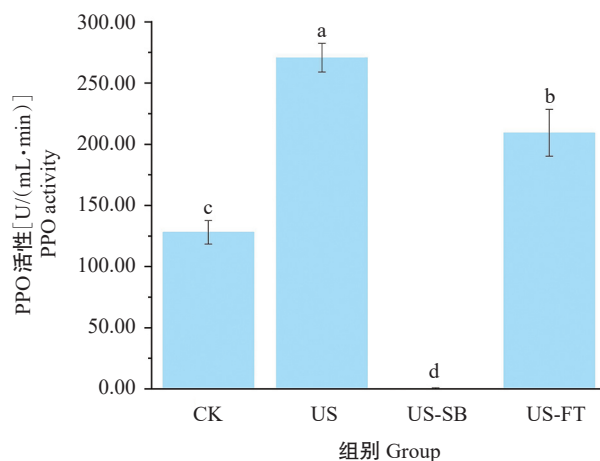


图3 不同预处理对微波干燥八角 PPO 活性的影响

Fig. 3 Effects of different pretreatments on PPO activity of microwave-dried star anise

图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。图4和图12~图14同
Different lowercase letters on the bar indicated significant difference ($P<0.05$). The same was applied in Fig. 4 and Fig. 12-Fig. 14

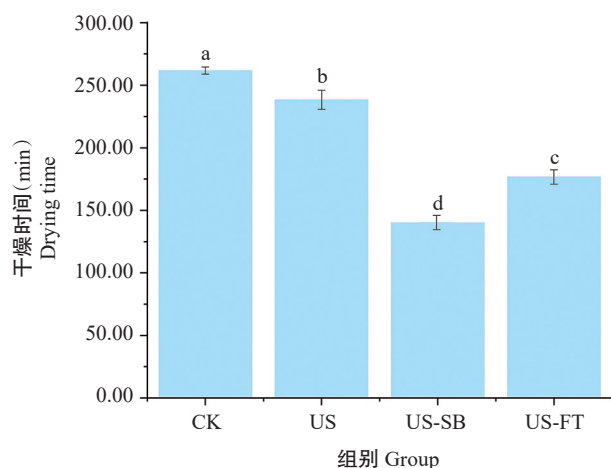


图4 不同预处理对八角干燥时间和单位能耗的影响

Fig. 4 Effects of different pretreatments on drying time and specific energy consumption of star anise

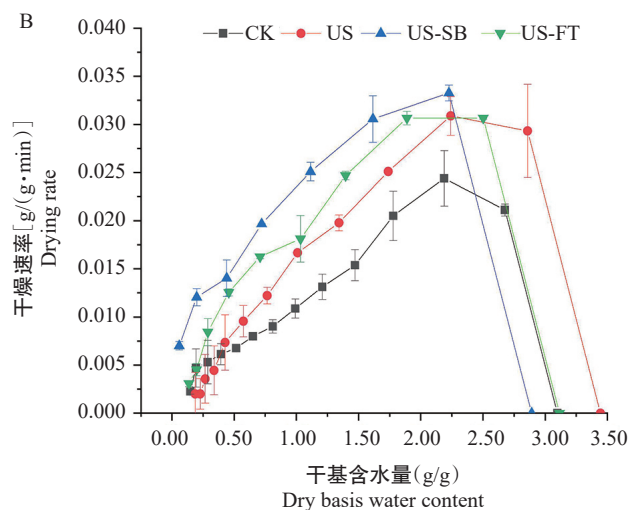
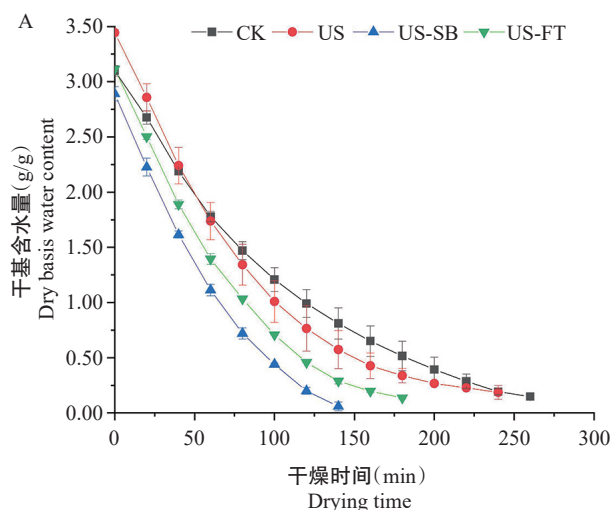
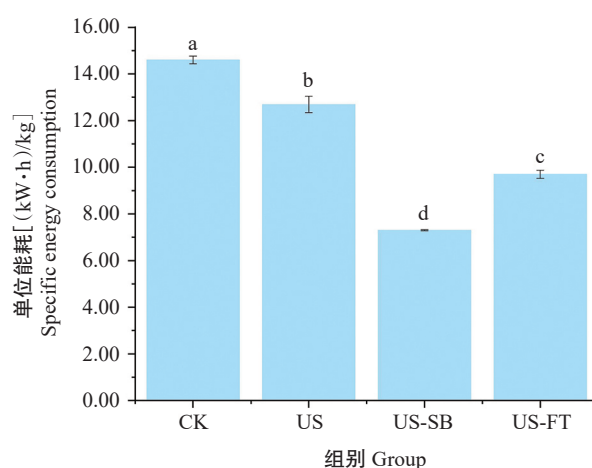


图5 不同预处理对八角干基含水量曲线(A)和干燥速率曲线(B)的影响

Fig. 5 Effects of different pretreatments on dry basis water content curves (A) and drying rate curves (B) of star anise

2.7 不同预处理条件下八角各状态水的弛豫峰面积变化规律

由图8可知,不同预处理条件下八角中的水分均以自由水为主,其峰面积(A_{23})占总峰面积的90%以上,其次为不易流动水(A_{22}),结合水(A_{21})和油脂相关质子(A_{24})所占比例低。在干燥初期, A_{23} 急剧下降, A_{22} 和 A_{21} 呈先上升后下降的变化趋势, A_{24} 则持续下降;当干燥进行至终点时,流动性最强的自由水几乎被完全去除,部分不易流动水因未能及时转化为自由水而留存在八角内部,结合最牢固的结合水及油脂相关质子则未被去除。因此,干燥末期八角内部仅含有油脂、结合水和少量不易流动水。

与CK组相比,各预处理组八角中水分的脱除速率明显更快,其中US-SB组峰面积下降最快,US-FT组次之,US组相对较慢。将4个弛豫峰的峰面积相加,得到总峰面积($A_{\text{总}}$),其变化可直接反映八角中总水分和油脂的脱除程度。

2.8 八角干基含水量与总峰面积相关分析结果

由图9可知,经拟合分析,在不同预处理条件下,八角的总峰面积与其干基含水量之间呈良好的线性正相关, $R^2 \geq 0.977$ 。

2.9 不同预处理条件下八角的伪彩色图像

由图10可知,随着干燥进行,在不同预处理条件下八角氢质子密度图像的亮度均逐渐降低,八角中心区域伪彩色图像最先由红绿色转为蓝色,随后蓝色区域向外围扩展。与CK组相比,各预处理组八角伪彩色图像的面积缩减速度明显加快,其中US-SB组图像面积缩小最快,US-FT组次之,US组相对较慢。

2.10 预处理对微波干燥八角色泽的影响

由图11可知,在 b^* 方面,3个预处理组与CK组均无显著差异;在 L^* 方面,3个预处理组均显著高于CK组(50.86),其中US-SB组最高(57.49),US组(53.04)与US-FT组(54.47)无显著差异;在 a^* 方面,US组和US-FT组较CK组分别显著提高15.74%和15.64%,而US-SB组与CK组无显著差异。

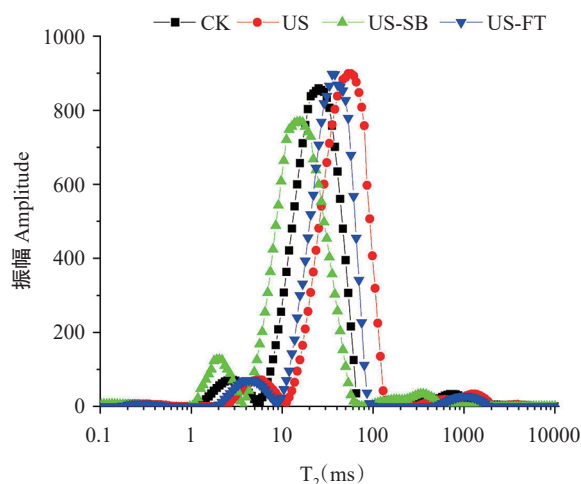


图6 不同预处理条件下八角的水分分布情况
Fig. 6 Water distribution of star anise under different pretreatment conditions

2.11 预处理对微波干燥八角体积收缩率的影响

体积收缩率是评价干燥样品原始形状保持程度的关键指标,收缩率越高,表示结构变形越大、形态保持性越差,反之亦然。由图12可知,US组(45.78%)和US-SB组(54.18%)的八角体积收缩率显著高于CK组(42.51%),US-FT组(41.88%)与CK组无显著差异。

2.12 预处理对微波干燥八角挥发油和莽草酸含量的影响

由图13可知,CK组八角挥发油和莽草酸含量分别为7.81%和9.65%,US组八角干制品挥发油和莽草酸含量分别为7.63%和9.57%,US-FT组分别为7.55%和9.52%,US-SB组分别为6.59%和8.20%;与CK组相比,US组和US-FT组干燥后的八角挥发油和莽草酸含量均无显著差异,而US-SB组2项指标含量均显著降低。

2.13 预处理对微波干燥八角抗氧化活性的影响

由图14可知,US组(80.41%)和US-FT组(82.55%)八角的DPPH自由基清除率较CK组分别显著提高22.28%和25.53%,而US-SB组(53.95%)较CK组显著降低17.96%。

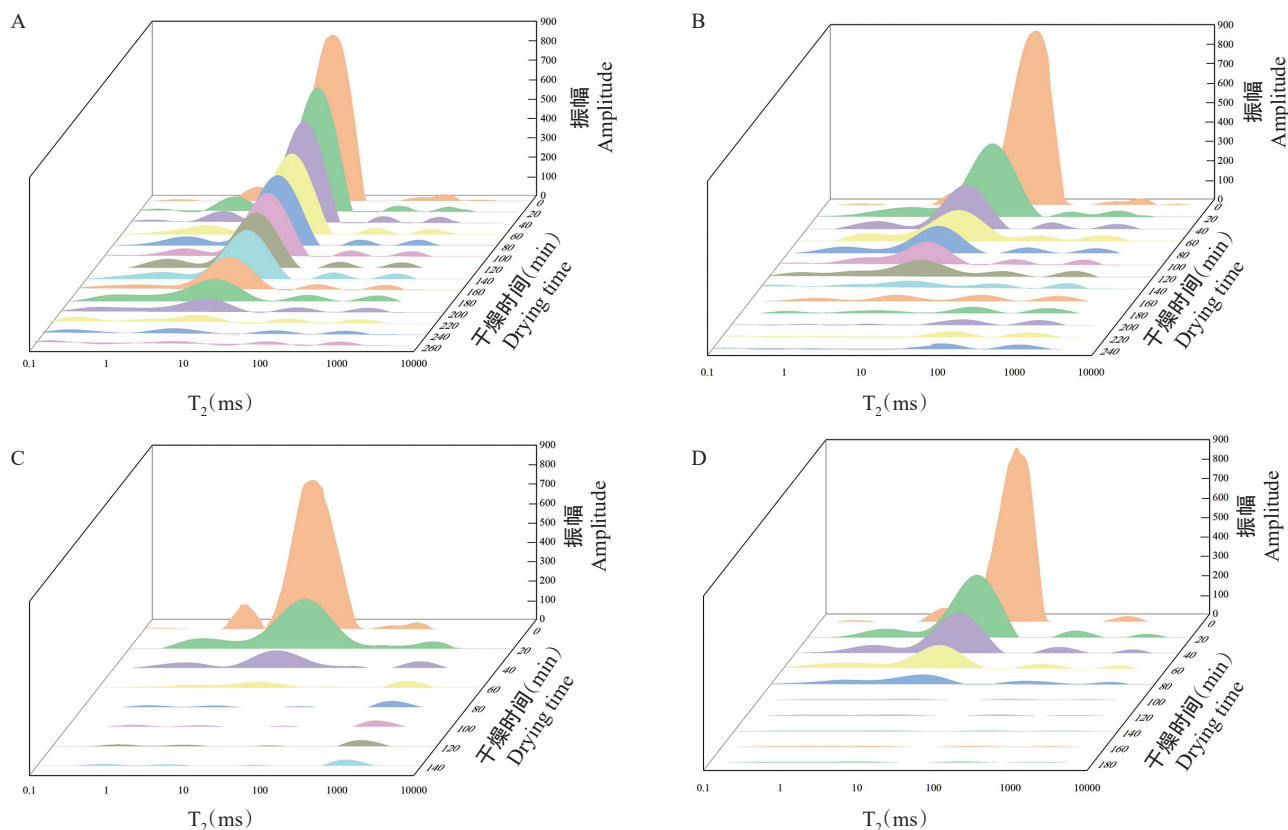
表1 不同预处理条件下八角的 T_2 及峰面积

Table 1 T_2 and peak area of star anise under different pretreatment conditions

组别 Group	T_{21} (ms)	T_{22} (ms)	T_{23} (ms)	T_{24} (ms)	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
CK	0.28±0.01b	2.78±0.13c	26.12±1.26c	730.47±35.10c	51.41±0.80	1572.29±46.34b	15362.92±621.21b	82.67±2.90a
US	0.32±0.02a	5.47±0.26a	55.18±2.65a	1258.32±60.46a	56.71±2.91	1511.71±77.17b	17717.69±1150.33a	80.11±2.88ab
US-SB	0.14±0.01c	1.98±0.09d	16.23±0.78d	345.82±16.62d	56.67±2.91	2208.30±187.71a	15293.01±733.47b	70.67±1.99c
US-FT	0.29±0.01ab	4.46±0.21b	36.70±1.76b	1026.17±49.31b	53.59±1.48	1529.27±46.85b	16911.86±669.80a	73.22±2.79bc

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P < 0.05$)

图7 不同预处理对八角 T_2 反演谱变化规律的影响Fig. 7 Effects of different pretreatments on change pattern of T_2 inversion spectra of star anise

A:CK;B:US;C:US-SB;D:US-FT

2.14 八角干燥后的外观、生物活性成分及抗氧化活性之间的相关分析结果

为了更直观地呈现干燥后八角色泽、体积收缩率、生物活性成分及抗氧化活性之间的相关性,采用 Pearson 相关性分析法对 7 项指标进行分析,并绘制相关性热图。由图 15 可知, L^* 与挥发油含量、莽草酸含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 下同); a^* 与 DPPH 自由基清除率呈极显著正相关;体积收缩率与挥发油含量、莽草酸含量、DPPH 自由基清除率均呈极显著负相关。

3 讨论

本研究对比分析 US、US-SB 及 US-FT 预处理组对八角微波干燥特性、微观结构、理化品质及抗氧化活性的影响,结果表明,3 种预处理均可有效破坏八角细胞组织结构,提高细胞膜通透性,从而形成更多水分迁移通道,最终显著缩短干燥时间、降低单位能耗、提高干燥速率。其中,US-SB 组干燥速率最快,而 US-FT 组干燥效率与产品品质综合表现最优。

本研究发现,所有预处理组均显著缩短干燥时间、降低单位能耗,其效率排序为 US-SB > US-FT > US > CK。这一结果的根本原因在于预处理对八角

微观结构的破坏,增强了水分迁移能力。光学显微镜和扫描电子显微镜图像证实,US、US-SB 和 US-FT 预处理均导致八角的细胞发生不同程度的变形、塌陷或孔隙增多,与 Wang 等(2024)在桑葚、虎鑫等(2025)在紫甘蓝中的观察结果一致。

低场核磁共振分析进一步揭示了预处理对八角水分分布的影响规律。不同预处理条件下八角中水分均以自由水为主(占比 > 90%)。US 预处理通过声波空化效应,不仅物理性地破坏细胞壁,还可能改变细胞壁多糖的结构(Wang et al., 2024),从而降低水分流动的阻力,表现为 T_2 谱图右移和 A_{23} 显著增大。表明部分结合较弱的不易流动水甚至结合水转化为移动性更强的自由水,为后续快速脱除打下基础。US-FT 预处理的增效机制则更为复杂。冷冻过程中形成的胞内冰晶对细胞器及细胞膜造成不可逆的机械损伤(Osae et al., 2024),解冻后细胞结构变得松散,形成了类似海绵的多孔结构。低场核磁共振分析显示,US-FT 预处理同样显著增加了 A_{23} 比例,并增大了其弛豫时间 T_{23} ,证实水分子活动增强。这种结构变化是 US-FT 组干燥效率显著优于 US 组的直接原因。

US-SB 预处理实现了最高的干燥效率,其机制

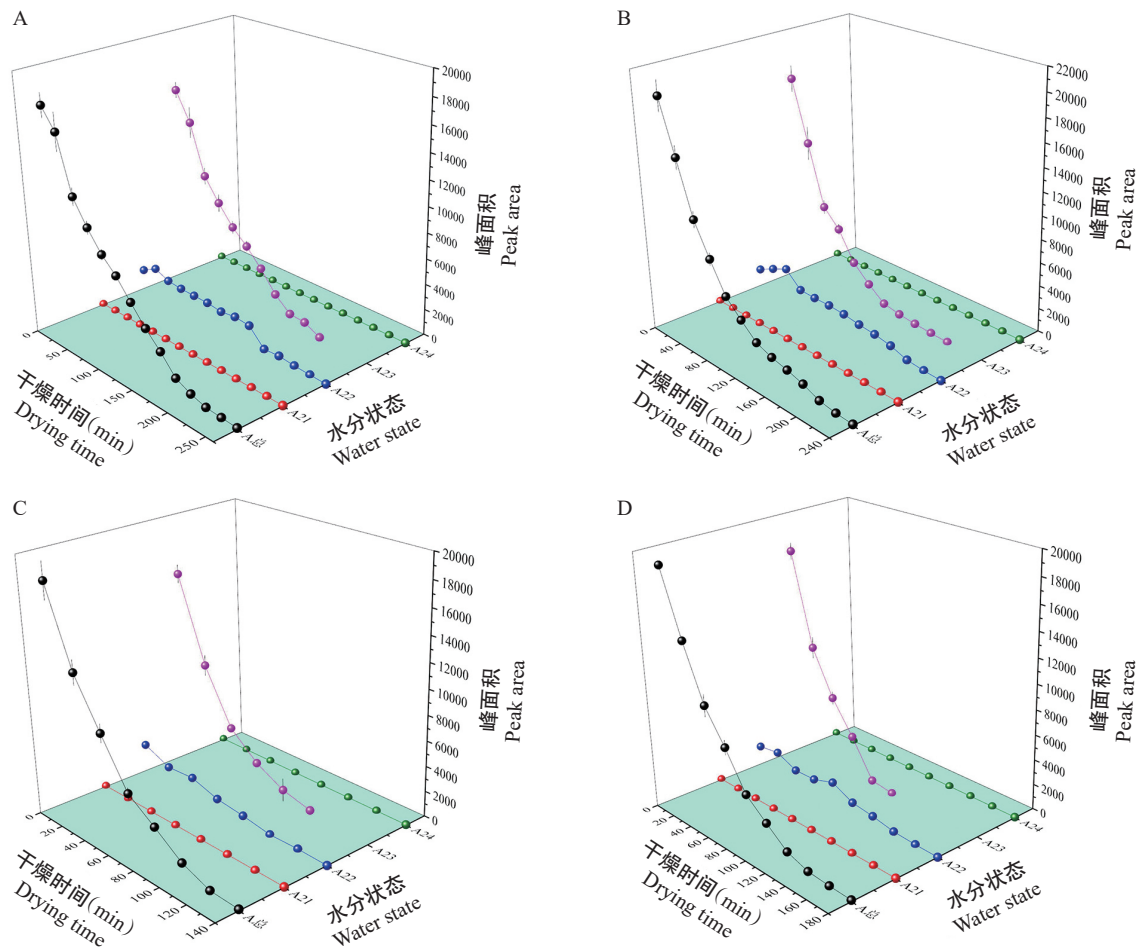


图8 不同预处理条件下八角各状态水的弛豫峰面积变化

Fig. 8 Change in relaxation peak areas of water in various states of star anise under different pretreatment conditions
A:CK;B:US;C:US-SB;D:US-FT

是物理损伤与高温物理作用的叠加。蒸汽漂烫使细胞膜蛋白变性,彻底瓦解了细胞室的阻隔作用;同时,高温使细胞内空气和水分急剧膨胀,进一步撕裂细胞结构。虽然低场核磁共振分析显示US-SB组八角的 A_{23} 下降,但并非初始自由水减少,而是由于剧烈的结构破坏使得水分在干燥前或初始干燥阶段就已迅速大量蒸发,导致在第一次核磁共振测量时,样品中的自由水含量已显著低于其他组。US-SB组的弛豫时间 T_{23} 显著左移也印证了水分子的生存环境发生剧变,移动性降低,可能是因为细胞结构的严重塌陷反而限制了部分水分的流动性,但并不影响US-SB预处理在微波场中整体脱水效率的优势。

颜色是决定干制品外观品质的关键因素之一。本研究中,US预处理和US-FT预处理八角的 a^* 显著高于CK组,这一变化与其PPO活性的变化密切相关。PPO活性测定结果显示,US组和US-FT组的PPO活性显著高于CK组。酶活性升高的主要原因是超声波通过空化效应破坏细胞结构,促进酶与底

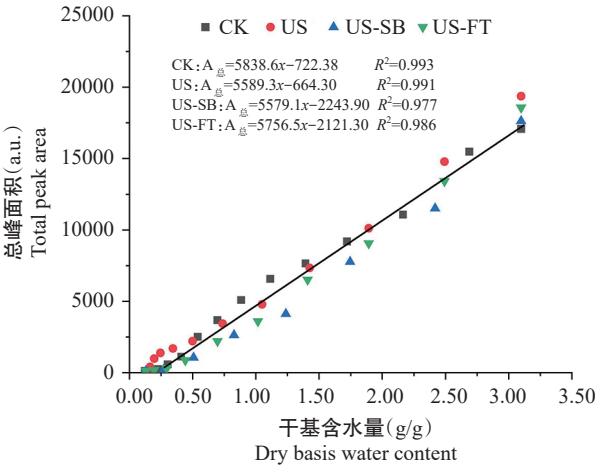


图9 不同预处理条件下八角干基含水量与总峰面积的相关性

Fig. 9 Correlation between dry basis water content and total peak area of star anise under different pretreatment conditions

物从细胞内释放;此外,超声波引发的机械振动作用还可能诱导酶构象发生变化,从而表现出更高的催化活性(Zhang et al.,2025a)。PPO活性的增强促进了干燥过程中酚类物质的酶促氧化,生成醌类及其

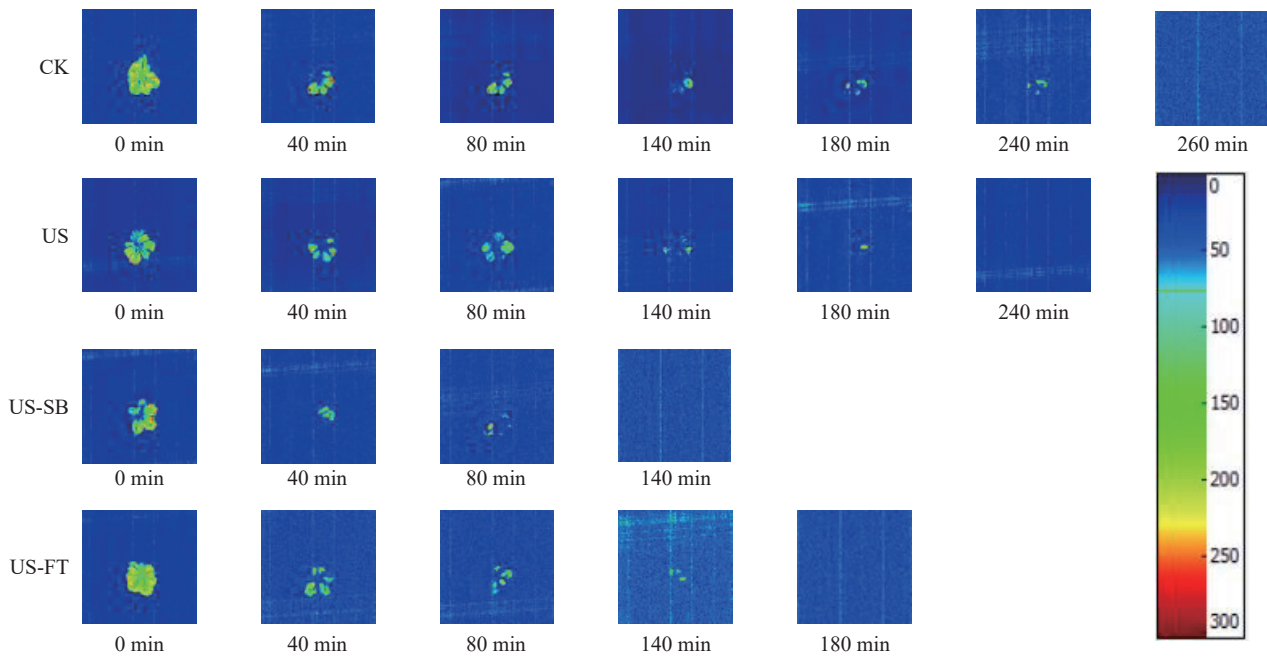


图 10 不同预处理条件下八角的伪彩色图像

Fig. 10 False-color images of star anise under different pretreatment conditions

聚合产物,从而提升八角的红亮色泽,与 Zhang 等 (2026)的研究结果一致,即热/非热预处理可通过结构改性和酶活性调控协同改善八角干燥品质。相比之下,US-SB组的PPO活性最低,几乎完全被钝化,活性值接近0 U/(mL·min),主要是因为蒸汽漂烫能有效灭活PPO,从而抑制酶促褐变反应(韩彦辉, 2023)。因此,US-SB组八角的 a^* 与CK组无显著差异,色泽改善效果不及US组和US-FT组。

在活性成分保留方面,US-FT组展现了显著优势。该预处理既能有效保留挥发油和莽草酸,又能

提升抗氧化活性,与虎鑫等(2025)研究紫甘蓝脆片干燥特性得出的结果类似,表明超声波联合冻融预处理能够在提高干燥效率的同时,较好地保护热敏性成分。挥发油和莽草酸并非决定八角抗氧化活性的唯一因素。本研究中,US组和US-FT组的挥发油及莽草酸含量与CK组无显著差异,但DPPH自由基清除率显著高于CK组,说明预处理对抗氧化活性的提升可能更多地与细胞结构破坏后抗氧化物质释放效率提高有关。US预处理的空化效应和US-FT预处理形成的冰晶损伤均可增加细胞膜通透性,促进多酚、黄酮等抗氧化成分从细胞内或结合态结构中释放;同时,US和US-FT预处理缩短了干燥时间,

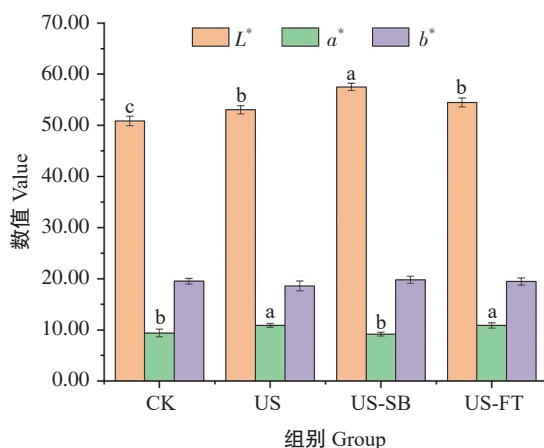


图 11 不同预处理对微波干燥八角色泽的影响

Fig. 11 Effects of different pretreatments on color of microwave-dried star anise

同一颜色图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters on the bar of the same color indicated significant difference ($P<0.05$)

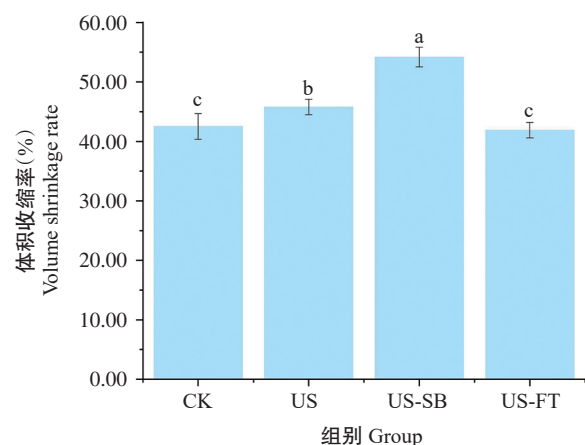


图 12 不同预处理对微波干燥八角体积收缩率的影响

Fig. 12 Effects of different pretreatments on volume shrinkage rate of microwave-dried star anise

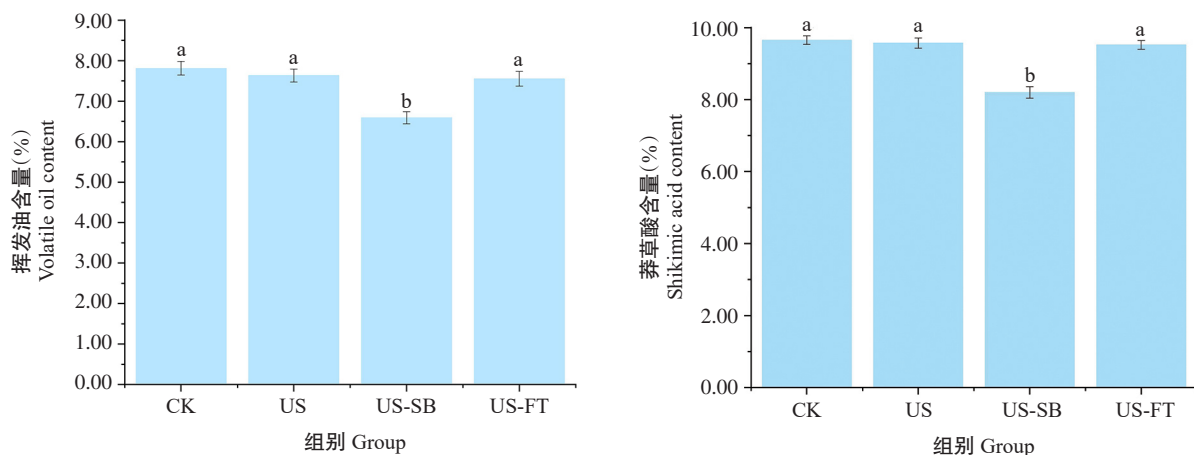


图 13 不同预处理对微波干燥八角挥发油和莽草酸含量的影响

Fig. 13 Effects of different pretreatments on volatile oil content and shikimic acid content in microwave-dried star anise

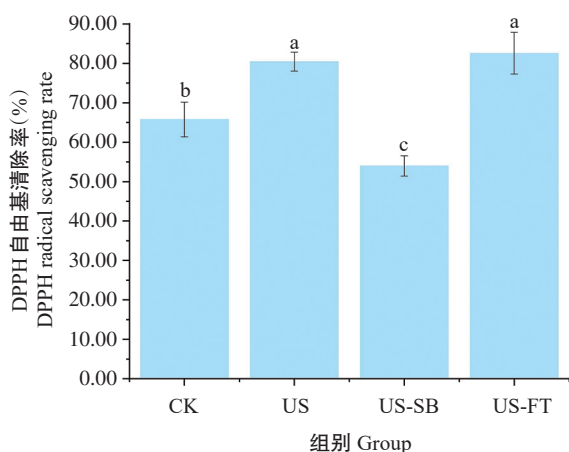


图 14 不同预处理对微波干燥八角 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig. 14 Effects of different pretreatments on DPPH radical scavenging capability of microwave-dried star anise

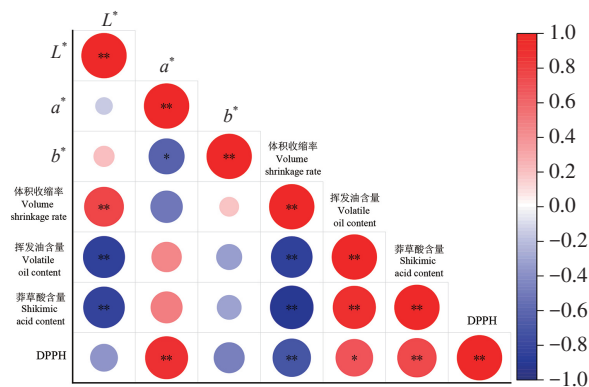


图 15 八角干燥后的外观、生物活性成分及抗氧化活性之间的相关性

Fig. 15 Correlation between appearance, bioactive component, and antioxidant activity of star anise after drying

*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)* indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated extremely significant correlation ($P<0.01$)

降低了长时间微波干燥过程中活性物质的氧化降解。因此,即使挥发油和莽草酸含量与CK组差异不显著,US组和US-FT组仍表现出更强的DPPH自由基清除能力。后续研究可进一步测定总酚、总黄酮及特征抗氧化成分,以深入阐明八角抗氧化活性变化的物质基础。相比之下,US-SB组虽然干燥效率最高,但其高温处理过程导致了挥发油的挥发与分解,以及水溶性莽草酸的浸出,与Ghosh等(2012)的研究结果一致,即高温漂烫会显著降低水溶性活性成分的保留率。

此外,US-FT组在显著提高八角干燥效率的同时,并未导致其体积收缩率的增加。这可能是由于冻融过程中形成的均匀冰晶对细胞结构起到了支撑作用,减轻了后续干燥过程中的组织塌陷(Osae et al., 2024)。这一特性对于保持八角饱满的外形具有重要意义。

综上所述,US-FT组能够兼顾干燥效率与产品品质,在缩短干燥时间、降低能耗的同时,改善色泽、保留活性成分并提升抗氧化活性,是一种高效、绿色的八角加工技术。本研究仅考察了3种超声波联合预处理对八角微波干燥效率和基础品质的影响,未进一步分析预处理对八角特征香气成分及贮藏稳定性的作用,后续可结合气相色谱—质谱联用、电子鼻及中试生产研究,深入解析US-FT预处理对八角风味轮廓的调控机制并评估其产业化可行性。

4 结论

综合干燥效率与产品品质,超声波联合冻融预处理效果最优,可在缩短干燥时间、降低能耗的同时,改善八角色泽,有效保留挥发油、莽草酸及抗氧化活性,且不增加体积收缩率。该技术为八角绿色干燥加工提供了可行方案。

参考文献(References):

- 曹玉丹, 年新, 肖自斌, 王梦泽, 刘世伟, 虎鑫, 刘晓娇, 辛丹阳. 2026. 超声波联合烫漂预处理提高辣椒真空脉动干燥效率及品质[J]. 食品工业科技, 47(7): 280-293. [Cao Y D, Nian X, Xiao Z B, Wang M Z, Liu S W, Hu X, Liu X J, Xin D Y. 2026. Ultrasound combined with blanching pretreatment improves the efficiency and quality of vacuum pulsed drying of chili pepper[J]. Science and Technology of Food Industry, 47(7): 280-293.] doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050045.
- 陈赛赛, 吴琼, 徐民, 杨文博, 陈虎, 郑琳, 陈超杰. 2025. 基于图像处理八角茴香品质鉴定方法研究[J]. 食品与发酵工业, 51(21): 383-391. [Chen S S, Wu Q, Xu M, Yang W B, Chen H, Zheng L, Chen C J. 2025. Research on quality identification method of star anise based on image processing[J]. Food and Fermentation Industries, 51(21): 383-391.] doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042186.
- 宫许林. 2023. 预处理对八角热风干燥特性及品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学. [Gong X L. 2023. Effect of pretreatments on the hot air drying characteristics and quality of star anise[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University.] doi: 10.27277/d.cnki.gsdnu.2023.000633.
- 郭向阳. 2025. 不同提取方法的八角茴香油香气特征的表征与分析[J]. 广西植物, 45(10): 1871-1881. [Guo X Y. 2025. Characterization and analysis of aroma characteristics of star anise oil obtained by different extraction methods[J]. Guihaia, 45(10): 1871-1881.] doi: 10.11931/guihaia.gxzw202411039.
- 韩彦辉. 2023. 远红外辐射加热怀山药的钝酶效果及对多酚氧化酶构象的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学. [Han Y H. 2023. The blunt enzyme effect of far infrared radiation heating and its effect on conformation of polyphenol oxidase[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology.] doi: 10.27115/d.cnki.glygc.2023.000753.
- 虎鑫, 连敏, 刘世伟, 肖自斌, 王梦泽, 曹玉丹, 辛丹阳, 任登成, 张晓燕. 2025. 超声-冻融对紫甘蓝脆片干燥特性的影响[J]. 食品科学, 46(20): 286-296. [Hu X, Lian M, Liu S W, Xiao Z B, Wang M Z, Cao Y D, Xin D Y, Ren D C, Zhang X Y. 2025. Effect of ultrasound-freeze-thaw pretreatment on the drying characteristics of purple cabbage crisps[J]. Food Science, 46(20): 286-296.] doi: 10.7506/spkx1002-6630-20250408-065.
- 黄纪民, 王溱兰, 邱展鸿, 吴钊龙, 覃海波, 李秉正, 黄志民. 2023. 干燥方式对黄精片干燥特性和微观结构的影响[J]. 广西科学院学报, 39(4): 445-451. [Huang J M, Wang Z L, Qiu Z H, Wu Z L, Qin H B, Li B Z, Huang Z M. 2023. Effects of drying methods on drying characteristics and microstructure of *Polygonatum kmgzanum* Coll. et Hemsl. slices[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 39(4): 445-451.] doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20231226.011.
- 金建龙, 苑亚, 董建, 杨鲁伟, 章学来, 魏娟, 喻颖睿. 2021. 八角热风干燥水分变化及品质分析[J]. 食品工业科技, 42(14): 79-85. [Jin J L, Yuan Y, Dong J, Yang L W, Zhang X L, Wei J, Yu Y R. 2021. Moisture transformation and quality analysis of star anise during hot air drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 42(14): 79-85.] doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110075.
- 李晨曦. 2023. 八角微波热泵联合干燥工艺参数研究[D]. 昆明: 云南农业大学. [Li C X. 2023. Study of drying process parameters with microwave-thermal pump combined of star anise[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University.] doi: 10.27458/d.cnki.gyny.2023.000695.
- 林芳, 吴钊龙, 韦忠宇, 杨媚, 李翠霞, 李莉莉, 马蓝宇, 刘忠林. 2025. 羊肚菌片微波干燥过程中水分变化及其品质分析[J]. 食品科学, 46(16): 313-321. [Lin F, Wu Z L, Wei Z Y, Yang M, Li C X, Li L L, Ma L Y, Liu Z L. 2025. Moisture changes and quality analysis of *Morchella esculenta* slices during microwave drying[J]. Food Science, 46(16): 313-321.] doi: 10.7506/spkx1002-6630-20250102-014.
- 盘喻颜, 段振华, 钟静妮. 2021. 利用低场核磁共振技术分析月柿果片微波间歇干燥过程中的内部水分变化[J]. 食品工业科技, 42(14): 33-39. [Pan Y Y, Duan Z H, Zhong J N. 2021. Analysis of internal moisture changes of persimmon slices during intermittent microwave drying using low-field NMR[J]. Science and Technology of Food Industry, 42(14): 33-39.] doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020110006.
- 覃海波, 张扬, 吴彦东, 李优, 吴钊龙, 黄纪民, 李秉正, 师德强. 2025. 微波干燥模式对天麻片干燥特性及品质的影响[J]. 广西科学院学报, 41(4): 402-411. [Qin H B, Zhang Y, Wu Y D, Li Y, Wu Z L, Huang J M, Li B Z, Shi D Q. 2025. Effect of microwave drying mode on drying characteristics and quality of *Gastrodia elata* slices[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 41(4): 402-411.] doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20260107.006.
- 仇徐亮, 冯蕾, 聂梅梅, 刘春泉, 李大婧, 张钟元, 李建林, 邱晓峰, 唐冬妹. 2024. 超声预处理对芥菜微波干燥品质的影响[J]. 农业工程学报, 40(6): 155-167. [Qiu X L, Feng L, Nie M M, Liu C Q, Li D J, Zhang Z Y, Li J L, Qiu X F, Tang D M. 2024. Effects of ultrasonic pretreatment on the microwave drying quality of shepherd's purse (*Capsella bursa-pastoris*) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 40(6): 155-167.] doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306209.
- 王乙淋, 李宏宇, 韦共宇, 蒙泳成, 黄勇. 2024. 基于转录组和代谢组分析八角黄酮类化合物合成途径关键基因[J]. 江苏农业科学, 52(12): 60-68. [Wang Y L, Li H Y, Wei G Y, Meng Y C, Huang Y. 2024. Study on key genes of flavonoid biosynthesis pathway in *Illicium verum* based on transcriptome and metabolome[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 52(12): 60-68.] doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2024.12.008.
- 吴钊龙, 巫腾钰, 邱展鸿, 黄纪民, 覃海波, 李秉正, 黄志民. 2023. 基于干燥动力学结合 LF-NMR 分析的不同干燥过程中天麻切片水分变化[J]. 广西科学院学报, 39(4): 433-444. [Wu Z L, Wu T Y, Qiu Z H, Huang J M, Qin H B, Li B Z, Huang Z M. 2023. Determination of moisture changes in *Gastrodia elata* Blume slices during different drying processes based on drying kinetics and LF-NMR analysis[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 39(4): 433-444.] doi: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20231226.010.
- 吴钊龙, 张小叶, 黄纪民, 李浩, 孙文波, 李秉正, 黄志民. 2022. 黄精片间歇微波干燥特性及模型拟合[J]. 江苏农业科学, 50(15): 156-162. [Wu Z L, Zhang X Y, Huang J M, Li H, Sun W B, Li B Z, Huang Z M. 2022. Characteris-

- tics and model fitting of intermittent microwave drying of *Polygonatum sibiricum* slices[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 50(15): 156-162. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.15.025.
- Ding X, Yang C W, Wang P P, Yang Z B, Ren X J. 2020. Effects of star anise (*Illicium verum* Hook. f.) and its extractions on carcass traits, relative organ weight, intestinal development, and meat quality of broiler chickens[J]. Poultry Science, 99(11): 5673-5680. doi: 10.1016/j.psj.2020.07.009.
- Ghosh S, Chisti Y, Banerjee U C. 2012. Production of shikimic acid[J]. Biotechnology Advances, 30(6): 1425-1431. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.03.001.
- Liu Y Q, Wu Z L, Li X H, Shi D Q, Yiu C Y, Li B Z, Huang Z M, Xiao H W. 2025. Study on drying behavior, quality attributes, shrinkage modeling and comprehensive evaluation of carrot slices by freeze drying combined with microwave drying[J]. Drying Technology, 43(9): 1448-1459. doi: 10.1080/07373937.2025.2532595.
- Osae R, Adjonu R, Apaliya M T, Engmann F N, Owusu-ansah P, Fauzia A S, Otoo G S, Kwaw E, Alolga R N. 2024. Freeze-thawing and osmotic dehydration pretreatments on physicochemical properties and quality of orange-fleshed sweet potato slice during hot air drying[J]. Food Chemistry Advances, 5: 100843. doi: 10.1016/j.focha.2024.100843.
- Shi Y, Chen G J, Chen K W, Chen X H, Hong Q Y, Kan J Q. 2021. Assessment of fresh star anise (*Illicium verum* Hook. f.) drying methods for influencing drying characteristics, color, flavor, volatile oil and shikimic acid[J]. Food Chemistry, 342: 128359. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128359.
- Wang K H, He P Y, Wang Q H, Yang Z Q, Xing Y, Ren W X, Wang J, Xu H D. 2024. Ultrasound pretreatment enhances moisture migration and drying quality of mulberry via microstructure and cell-wall polysaccharides nanostructure modification[J]. Food Research International, 184: 114245. doi: 10.1016/j.foodres.2024.114245.
- Wu Z L, Zhou Y M, Huang C Y, Shi D Q, Huang J M, Ruan Q J, Li B Z, Huang Z M, Xiao H W. 2026. Comprehensive evaluation on drying efficiency and quality attributes of star anise using different pretreatment and drying methods[J]. Drying Technology, 44(8): 1229-1244. doi: 10.1080/07373937.2026.2652462.
- Xu Y, Qi J, Yu M M, Zhang R S, Lin H G, Yan H M, Li C, Jia J M, Hu Y. 2023. Insight into the mechanism of water-insoluble dietary fiber from star anise (*Illicium verum* Hook. f.) on water-holding capacity of myofibrillar protein gels[J]. Food Chemistry, 423: 136348. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136348.
- Zhang L H, Liao L, Qiao Y, Wang C, Shi D F, An K J, Hu J Z. 2020. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying[J]. Food Chemistry, 303: 125386. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125386.
- Zhang S L, Huang Q B, Kuang X M, Guo C F, Jiang Y L, Zhang F J, Pan D H, Du M, Devahastin S, Yi J J. 2026. Synergistic regulation of drying quality in star anise (*Illicium verum* Hook. f.) through thermal and non-thermal pretreatments: Roles of structural modification and enzyme influence[J]. Food Research International, 230: 118627. doi: 10.1016/j.foodres.2026.118627.
- Zhang S L, Huang Q B, Kuang X M, Guo C F, Jiang Y L, Zhang F J, Pan D H, Du M, Devahastin S, Yi J J. 2025a. Cavitation-enhanced aroma and browning: A multiscale study of star anise (*Illicium verum* Hook. f.) pretreated by ultrasound and electrolyzed water[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 123: 107693. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107693.
- Zhang S L, Kuang X M, Guo C F, Jiang Y L, Zhang F J, Devahastin S, Du M, Yi J J. 2025b. Advanced strategies for the processing and utilization of star anise (*Illicium verum* Hook. f.): Blanching, drying and bioactive compounds extraction[J]. Food Research International, 217: 116863. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116863.
- Zou Q Y, Huang Y Y, Zhang W Y, Lu C, Yuan J Q. 2023. A comprehensive review of the pharmacology, chemistry, traditional uses and quality control of star anise (*Illicium verum* Hook. f.): An aromatic medicinal plant[J]. Molecules, 28(21): 73-78. doi: 10.3390/molecules28217378.

(责任编辑: 罗 丽)