曹玉丹, 年新, 肖自斌, 等. 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, 2026, 47(7): 280−293. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050045

CAO Yudan, NIAN Xin, XIAO Zibin, et al. Ultrasonic Combined with Blanching Pretreatment Improves the Efficiency and Quality of Vacuum Pulsation Drying of Chili Peppers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 280−293. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050045

·包装与机械·

# 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

曹玉丹[1], 年　新[1], 肖自斌[2], 王梦泽[1,*], 刘世伟[2], 虎　鑫[1], 刘晓娇[2], 辛丹阳[1]

（1.宁夏大学食品科学与工程学院, 宁夏银川 750021;
2.宁夏回族自治区园艺技术推广站, 宁夏银川 750021）

**摘　要:** 为了提高真空脉动干燥辣椒干燥效率、改善品质，获得最佳预处理方法，本研究采用超声波、超声波联合烫漂及超声波联合冻融对辣椒进行干燥前预处理，并对真空脉动干燥辣椒干燥特性、理化性质及挥发性成分进行分析。结果表明，预处理均能有效缩短真空脉动干燥辣椒干燥时间、降低能耗比，并改善样品理化品质与风味，且超声波联合烫漂作用效果最佳。与对照样品相比，超声波联合烫漂样品干燥时间缩短 29.15%，能耗比降低 39.19%，辣椒红素保留率达到 100%，辣椒素、二氢辣椒素、$V_C$ 和总酚含量分别增加了 28.68%、31.46%、10.10%、68.90%，DPPH 自由基清除能力、总抗氧化能力分别增加了 14.11%、70.45%，且物理性质改善效果最佳、挥发性物质保留最好；通过微观结构、低场核磁共振分析，揭示了预处理使细胞组织结构破损是干燥时间缩短、能耗比降低与品质改善的主要原因；Pearson 相关性分析表明，醛类和酯类与 $a^*$值、$V_C$ 和辣椒红素含量呈正相关，而壬醛与辣椒素和二氢辣椒素含量呈负相关。该研究为辣椒干燥降低能耗比和品质改善提供了理论与技术支撑。

**关键词:** 非热处理, 真空脉动干燥, 干燥特性, 理化性质, 挥发性成分

**中图分类号:** S641.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0280−14

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025050045

本文网刊:

# Ultrasonic Combined with Blanching Pretreatment Improves the Efficiency and Quality of Vacuum Pulsation Drying of Chili Peppers

**CAO Yudan[1], NIAN Xin[1], XIAO Zibin[2], WANG Mengze[1,*], LIU Shiwei[2], HU Xin[1], LIU Xiaojiao[2], XIN Danyang[1]**

（1.School of Food Science and Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2.Ningxia Hui Autonomous Region Horticulture Technology Extension Station, Yinchuan 750021, China）

**Abstract:** To enhance the drying efficiency and quality of vacuum pulsation-dried chili peppers and to obtain the optimal pretreatment method, this study used ultrasonic, ultrasonic combined with blanching, and ultrasonic combined with freeze-thawing for the pre-drying pretreatment of chili peppers and analyzed the drying characteristics, physicochemical properties, and volatile composition of vacuum pulsation-dried chili peppers. The results showed that all the pretreatments effectively shortened the drying time, reduced the energy consumption of vacuum pulsation drying of chili peppers, and improved the physicochemical quality and flavor of the samples, and the ultrasonic combined with blanching had the best effect. Compared with the control samples, ultrasonic combined with blanching samples shortened the drying time by 29.15%, reduced energy consumption ration by 39.19%, retained capsorubin reached 100%, increased the contents of

**收稿日期:** 2025−05−08

**基金项目:** 国家重点研发计划项目（2021YFD1600305）。

**作者简介:** 曹玉丹（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 特色果蔬加工与品质控制, E-mail: 17811276307@163.com。

*** 通信作者:** 王梦泽（1981−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 特色果蔬加工与品质控制, E-mail: wangmengze@nxu.edu.cn。

capsaicin, dihydrocapsaicin, vitamin C, and total phenols by 28.68%, 31.46%, 10.10%, and 68.90%, respectively, increased DPPH radical scavenging capacity and total antioxidant capacity by 14.11% and 70.45%, respectively, and had the best physical properties improvement and volatile substances retention; by microstructure and low-field nuclear magnetic resonance analysis revealed that the breakage of cellular tissue structure by pretreatment was the main reason for the shortening of drying time, the reduction of energy consumption and the improvement of quality. Pearson correlation analysis showed that volatiles such as aldehydes and esters were positively correlated with the $a^*$ value, vitamin C content, and capsanthin content, whereas nonanal exhibited a negative correlation with capsaicin and dihydrocapsaicin content. This study provides theoretical and technical support for reducing the energy consumption and improving the quality of chili pepper drying.

**Key words**: non-thermal treatment; vacuum pulsation drying; drying characteristics; physical and chemical properties; volatile components

辣椒（*Capsicum annuum* L.）为茄科辣椒属一年生或多年生草本植物，是广泛分布于全球的经济作物，富含辣椒红素、辣椒素、维生素、酚类等抗氧化物质，具有较高的食用价值与药用价值，因其独特的色泽和风味广受消费者的青睐[1]。新鲜辣椒易腐烂、保鲜期短，常通过干燥来延长其保质期，传统的干燥方法主要有自然晾晒和热风干燥，自然晾晒成本低，易受气候影响和二次污染，品质无法有效控制；热风干燥操作简单，干燥温度高、时间长，干品品质劣变严重[2]。近年来，真空冷冻干燥、真空脉动干燥等真空干燥技术已广泛应用于农产品与食品加工中，真空冷冻干燥由于物料在低温、低氧环境下干燥，能最大程度地保存果蔬的品质，但干燥效率低、耗能高，产品酥脆易破损，而真空脉动干燥作为一种新型的干燥技术，利用真空度的变化有效增强毛细管通道的传质，可提高干燥效率，且质地较硬[3]。真空脉动干燥与真空冷冻干燥相比，产品品质略差，活性成分损失大，而与热风干燥相比，干燥耗能大，生产成本高[4]。因此，如何在提高干燥效率，降低生产成本的同时，确保生产出色泽优、风味佳的产品，是真空脉动干燥技术推广应用面临的主要技术瓶颈，已成为行业亟需解决的问题。

研究表明，干燥前适当的预处理不仅可以降低物料干燥初始的含水量，提高干燥速率、缩短干燥时间并降低成本，还可以改善果蔬干燥产品的理化性质[5−7]。其中，超声波处理（Ultrasonic treatment, US）可改变果蔬细胞结构，削弱细胞之间的黏附，使组织形成微通道，从而提高干燥效率，改善干制品品质；烫漂处理可使果蔬细胞组织软化、通透性增加，且能最大程度抑制酶活性，从而提高干燥效率，改善干制品品质；冻融处理形成的冰晶可破坏果蔬细胞结构，降低细胞壁的粘附性，从而提高干燥效率，改善干制品品质，但不能抑制酶活性；联合预处理能更好地提高果蔬干燥效率和改善品质[8−12]。目前，研究只报道了超声波、烫漂、冻融单一预处理对果蔬干燥效率和品质的影响，超声波联合烫漂预处理（Ultrasonic combined with blanching treatment, US-BL）、超声波联合冻融预处理（Ultrasonic combined with freeze-thawing treatment, US-FT）对果蔬干燥效率和品质的影响鲜有报道。

因此，本文旨在研究 US、US-BL、US-FT 对真空脉动干燥辣椒干燥特性、理化性质、抗氧化性及风味的影响，并通过水分分布、微观结构揭示预处理对辣椒干燥特性、理化性质影响的作用机制。这将为辣椒真空脉动干燥提供理论依据与技术支撑，推动该技术在农产品干燥中产业化应用。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

朝天椒（娇艳 8 号）　宁夏彭阳县塬乡赵山村辣椒种植基地提供，挑选大小、颜色、成熟度一致，无病虫害、机械损伤的辣椒为原料，经去蒂、清洗干净后切成 1.50±0.20 cm 的辣椒段备用；福林酚、甲醇（分析纯）、四氢呋喃（色谱纯）　上海跃腾生物技术有限公司；辣椒素标准物质（分析纯）、二氢辣椒素标准物质（分析纯）、辣椒红素标准物质（色谱纯）　雷泰生物科技有限公司；DPPH 自由基清除能力检测试剂盒、总抗氧化能力（T-AOC）检测试剂盒　苏州格锐思生物科技有限公司；4-甲基-2-戊醇　色谱纯，上海三美化工有限公司；$C_7$~$C_{40}$ 正构烷烃混合溶液　色谱纯，上海安谱实验科技股份有限公司。

CR-20 手持色差仪　北京海勤科技有限公司；SH-6600 紫外分光光度计　江苏盛奥华环保科技有限公司；ESJ30-5A 电子天平　神宇龙腾；IKA RV3 旋转蒸发仪　德国艾卡；DHG-1B 鼓风干燥箱、KQ3200E 超声波清洗器　青岛精诚仪器仪表有限公司；TD5Z 离心机　上海安亭科学仪器厂；TA.XT2i/520 物性测定仪　南京欧熙科贸有限公司；TFDSO.25 真空脉动干燥机　烟台中孚冷链设备有限公司；Agilent 1260 高效液相色谱仪　日本岛津公司；SMF 2002 粉碎机　浙江苏泊尔有限公司；MesoMR23-060H-I 核磁共振分析与成像仪　上海纽迈电子科技有限公司；S-570 扫描电镜　日本日立公司；7890A 气相色谱仪　美国安捷伦公司；LHS20-HR 快速水分测定仪　上海精密科学仪器有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　预处理方法　经过前期预实验筛选并确定了

最佳参数条件: 超声波功率(400 W)、频率(40 kHz)、时间(20 min); 烫漂温度(100 ℃)、时间(90 s); 冻融次数(1 次, 冷冻−20 ℃/24 h, 室温解冻/12 h)。具体预处理方法如下。

1.2.1.1 对照组处理 称取 200±10 g 辣椒段, 擦去表面水分后进行真空脉动干燥。

1.2.1.2 超声波预处理 称取 200±10 g 辣椒段, 放入装有蒸馏水的烧杯中(料液比为 1∶5), 在 400 W、40 kHz 条件下超声波处理 20 min 后, 用厨房纸吸干表面水分备用。

1.2.1.3 超声波联合烫漂预处理 将 1.2.1.2 超声波处理后的辣椒段置于 100±4 ℃ 蒸汽中烫漂, 烫漂 90 s 后立即用冷水冷却, 用厨房纸吸干表面水备用。

1.2.1.4 超声波联合冻融预处理 在 1.2.1.2 超声波处理后将辣椒段置于−20 ℃ 的条件下冷冻 24 h, 再置于室温下解冻 12 h, 冻融完成后进行真空脉动干燥。

1.2.2 真空脉动干燥 将切分后未预处理(Control, CK)及 US、US-BL 和 US-FT 的辣椒段, 擦去表面水分后, 在 60 ℃、脉动比为 10∶5(min:min)(7.5 kPa 真空保持 10 min, 101 kPa 常压保持 5 min)下进行真空脉动干燥。在整个脉动干燥时间内, 每 60 min 对样品进行称量, 直到辣椒的干基含水率(MC)≤0.13 g/g, 停止该过程, 实验平行三次。

1.2.3 预处理对辣椒真空脉动干燥特性的影响

1.2.3.1 能耗比的测定 使用电能表记录辣椒干燥所需的能耗比, 计算公式如下[13]:

$$E_s = \frac{E}{M} \quad \text{式(1)}$$

式中: $E_s$ 表示能耗比, kW·h/kg; E 表示总能耗(与设备连接的电表测量), kW·h; M 表示辣椒的脱水量, kg。

1.2.3.2 水分比 含水率使用快速水分测定仪进行测定, 干燥过程中的干燥曲线采用水分比(MR)随时间变化的曲线进行描述[14]。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式(2)}$$

式中: $M_t$ 表示干燥期间 t 时辣椒的干基含水率, g/g; $M_0$ 表示初始时刻辣椒的干基含水率, g/g; $M_e$ 表示辣椒平衡干基含水率, g/g。由于平衡含水率 $M_e$ 远小于 $M_0$ 和 $M_t$, 通常可以忽略不计[15]。

不同干燥时间下辣椒的水分比计算公式可以简化为:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{式(3)}$$

1.2.3.3 干燥速率 干燥速率(DR)的计算公式如下[16]:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad \text{式(4)}$$

式中: $M_{t1}$ 和 $M_{t2}$ 分别表示真空脉动干燥 $t_1$ 和 $t_2$ 时辣椒的干基含水率, g/g; $t_1$ 和 $t_2$ 为对应的干燥时间, min。

1.2.4 预处理对真空脉动干燥辣椒细胞结构的影响

1.2.4.1 扫描电镜 用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察辣椒样品的微观结构[17]。取少量辣椒干燥样品放置于电镜样品台中央部分并用导电胶固定, 进行 5 min 离子溅射法喷金镀膜处理, 然后进行观察。

1.2.4.2 水分分布 使用低场核磁共振(Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)分析仪评估辣椒在预处理过程中的水分状态[18]。将大约 2 g 的辣椒放入 LF-NMR 分析仪玻璃管中, 并使用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)脉冲序列来确定自旋-自旋弛豫时间($T_2$)。CPMG 脉冲序列参数为: 重复时间 6500 ms, 累加次数 16 次, 回波数 16000, 回波时间 0.4 ms, 采用 MultiExp Inv Analysis 分析软件对辣椒横向弛豫时间($T_2$)进行分析, 并根据 $T_2$ 计算出对应的相对峰面积($A_2$)。

1.2.5 预处理对真空脉动干燥辣椒物理性质的影响

1.2.5.1 色泽的测定 采用手持色差仪测定辣椒色泽[19], 得到 $L^*$、$a^*$、$b^*$值并计算总色差值, 每个处理 3 次平行。色差值 $\Delta E$ 计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{式(5)}$$

式中: $\Delta E$ 表示色差值; $L_0^*$、$a_0^*$、$b_0^*$表示干燥后 CK 样品的色值参数, $L^*$、$a^*$、$b^*$表示干燥后处理组样品的色值参数。$\Delta E$ 值越小说明辣椒色泽越亮越好。

1.2.5.2 质构的测定 选取形状, 大小一致的辣椒, 采用物性测试仪对干燥后样品的硬度、咀嚼性进行测定[20]。选择直径为 2 mm 的圆柱形 HDP 探头, 操作参数: 预测试速度 3.0 mm/s, 测试速度 1.0 mm/s, 回程速度 3.0 mm/s, 触发力 100 g。用最大力值表示样品的硬度, 单位为“N”, 力越大, 硬度越大。

1.2.5.3 复水比的测定 将 2.0 g 干制辣椒段置于 50 mL 蒸馏水中, 室温下放置 12 h 后取出, 用滤纸去除表面水分, 称量[21]。复水前后辣椒的复水比按以下公式计算:

$$R = \frac{m_f}{m_d} \quad \text{式(6)}$$

式中: R 表示复水比; $m_d$ 表示干制辣椒段质量, g; $m_f$ 表示复水后辣椒段质量, g。

1.2.6 预处理对真空脉动干燥辣椒化学性质的影响

1.2.6.1 辣椒红素含量的测定 液氮研磨样品, 准确称取约 0.50 g 辣椒粉末于 15 mL 透明离心管, 加入 2 mL 乙腈, 放置振荡器充分振荡混匀 5 min, 4 ℃ 超声波 1 h, 取出后离心 10 min(4000 r/min), 将上清液移至另一 15 mL 透明离心管中。再向样品中加入 2 mL 乙腈, 重复上述操作。合并两次上清液, 用乙腈

定容至 4 mL，充分混匀，用 0.22 μm 滤膜过滤，滤液待液相色谱测定[22]。

1.2.6.2　辣椒素类物质含量的测定　辣椒素和二氢辣椒素的提取与测定参照 GB/T 21266-2007[23]。将粉碎的样品用甲醇-四氢呋喃混合溶剂经超声提取，然后用反向高效液相色谱-紫外可见检测器进行色谱分析，采用外标法定量。

1.2.6.3　维生素 C（Vitamin C，$V_C$）含量的测定　使用 2,6-二氯靛酚法对 $V_C$ 含量进行测定[24]，采用 2,6-二氯靛酚作为试剂，通过滴定法测定 $V_C$ 含量，$V_C$ 含量使用以下公式计算：

$$V_C = \frac{(V_1 - V_0) \times \rho \times V}{m} \times 100 \quad \text{式（7）}$$

式中：$V_C$ 表示 100 g 辣椒中的 $V_C$ 含量，mg/100 g；m 表示样品的总质量，g；$V_1$ 表示样品滴定用的试剂体积，mL；$V_0$ 表示在空白试验（不加入样品）使用的试剂体积，mL；$\rho$ 表示滴定剂的浓度，mg/mL；V 表示稀释因子，即样品溶液的总体积与滴定用的样品溶液体积的比值。

1.2.6.4　总酚含量的测定　总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定[25]。将 500 μL 提取物加入稀释后的 Folin-Ciocalteu 试剂中，再加入 2 mL 碳酸钠充分混合。反应 30 min 后，使用甲醇作空白 CK，用 760 nm 波长检测，结果以没食子酸当量（mg GAE/100 g）表示。

$$W = \frac{C \times V \times N}{M} \times 100 \quad \text{式（8）}$$

式中：W 表示总酚含量，mg GAE/100 g；C 表示没食子酸质量浓度，mg GAE/mL；V 表示提取液体积，mL；N 表示稀释倍数；M 表示取样量，g。

1.2.7　预处理对真空脉动干燥辣椒抗氧化活性的影响　称取 1.00 g 辣椒粉末，加入 80% 的甲醇溶液 20 mL，超声波提取 30 min 后避光静置 30 min，取上清液并稀释 20 倍作为待测液，于 4 ℃ 储存，24 h 内测定[26]。

1.2.7.1　DPPH 自由基清除能力测定　DPPH 自由基清除能力采用试剂盒测定。

1.2.7.2　T-AOC 总抗氧化能力测定　T-AOC 总抗氧化能力采用试剂盒测定。

1.2.8　预处理对真空脉动干燥辣椒挥发性成分的影响　使用气相色谱-质谱联用（Gas chromatography-mass spectrometer，GC-MS）仪对样品进行检测。首先，对样品中的挥发性化合物采用顶空固相微萃取（Headspace solid-phase microextraction，HS-SPME）法分析，具体操作如下：将 1.00 g 的辣椒粉末转移到 15 mL 固相微萃取瓶中，加入 20 μL 4-甲基-2-戊醇（1.027 g/L）的内标液，立即用 PTFE-硅胶隔膜密封，置于 60 ℃ 恒温水浴锅中，再将萃取头通过瓶盖插入到辣椒中的顶空部分，顶空吸附 45 min 后拔出。然后，放入 250 ℃ GC-MS 仪的气相色谱进样口中解析 5 min，进行 GC-MS 分析[27]。将 GC 烘箱的初始温度设置为 45 ℃，维持 10 min 后，以 6 ℃/min 升温至 200 ℃ 并维持 5 min。实验采用氦气作为载气，流速恒定在 1.0 mL/min。质谱检测器的工作条件为电子轰击（EI）模式，电子能量设定为 70 eV；离子源温度为 230 ℃，四极杆温度为 150 ℃；传输线温度 280 ℃；全扫描模式，质量扫描范围 m/z 35~500。化合物的初步鉴定通过比对未知物的质谱图与 Wiley07 标准谱库完成，匹配因子阈值设为 80%。通过计算各组分的线性保留指数（RI），并与已知标准物质的 RI 值进行对比，进一步验证化合物的结构，并通过内标法（4-甲基-2-戊醇）计算挥发性化合物的含量[28]。计算公式如下：

$$X = \frac{A_i \times C_s \times V_s}{A_s \times m} \quad \text{式（9）}$$

式中：X 为样品中挥发性化合物的含量，μg/g；$A_i$ 为挥发性化合物的峰面积；$C_s$ 为内标溶液的浓度，μg/L；$V_s$ 为加入内标溶液的体积，L；$A_s$ 为内标的峰面积；m 为样品质量（g）。

### 1.3　数据处理

所有实验数据均重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。使用 SPSS 22.0 对结果进行 ANOVA 方差分析，$P<0.05$ 表示不同预处理方法之间的显著差异。使用 Origin 2024b 绘制皮尔森（Pearson）相关性热图和其他图表，通过 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析（PCA），并利用 TBtools 2024 软件完成层次聚类分析（Hierarchical clustering analysis，HCA）。

## 2　结果与分析

### 2.1　预处理对辣椒真空脉动干燥特性的影响

2.1.1　干燥时间与能耗比　所有样品干燥时间、能耗比及初始干基含水率如图 1（A）（B）（C）所示。由图 1（A）和（B）可知，与 CK 相比，处理组样品的干燥时间及能耗比均显著降低（$P<0.05$）。US、US-BL、US-FT 样品干燥时间分别为 14.2、12.5 和 11.5 h，与 CK 相比，干燥时间分别缩短了 15.35%、29.15% 和 37.89%，能耗比分别降低了 22.46%、39.19% 和 47.62%。而由图 1（C）可知，与 CK 相比，US、US-BL 样品初始含水率分别增加了 26.25%、31.88%，US-FT 样品初始含水率降低了 3.75%。说明干燥前样品含水率不是缩短干燥时间和降低能耗的主要原因，导致这一结果的主要原因可能是超声波、烫漂和冻融作用使鲜辣椒细胞壁、细胞膜结构发生不可逆损伤，细胞组织水分扩散速率增大，从而提高了辣椒的干燥速率[29−30]。

2.1.2　干燥曲线　为深入探讨 US、US-BL 和 US-FT 使辣椒真空脉动干燥时间缩短和能耗比降低的原因，绘制了所有样品干燥曲线和干燥速率曲线，如图 1（D）和（E）所示。根据图 1（D）（E），将干燥过程分为加速干燥阶段（0~10 h）和降速干燥阶段（10~16 h），

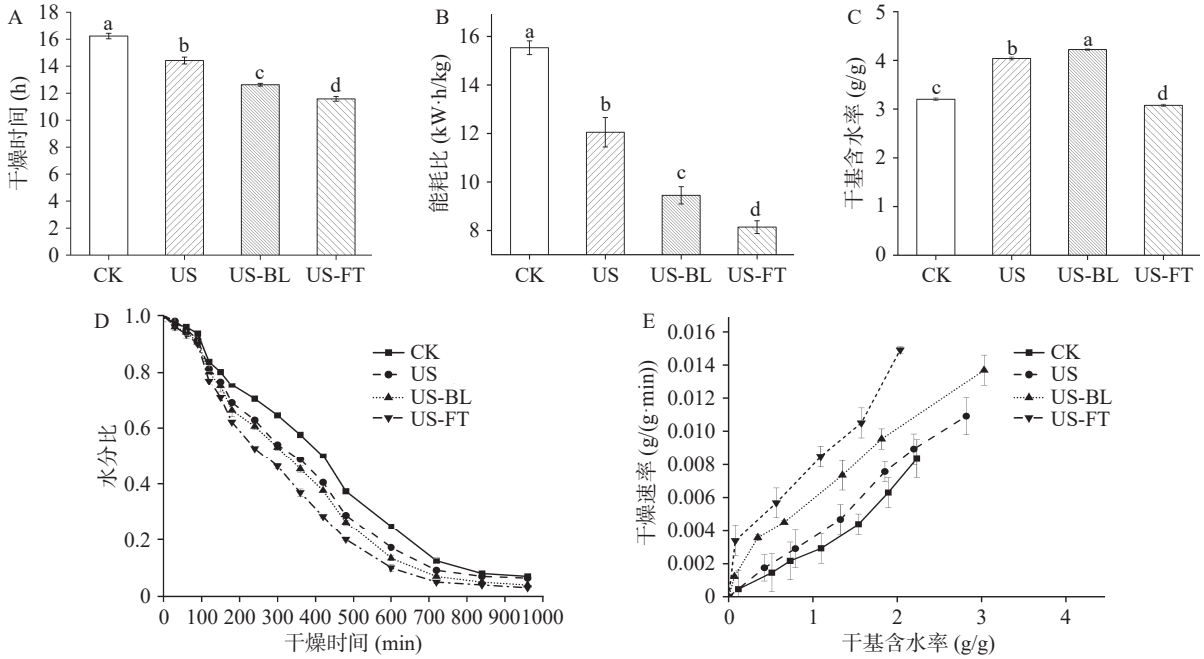



图 1 预处理对辣椒干燥时间(A)、能耗比(B)、干基含水率(C)、干燥曲线(D)、干燥速率曲线(E)的影响

Fig.1 Effect of pretreatment on drying time (A), energy consumption ration (B), drying basis moisture content (C), drying curve (D), and drying rate curve (E)

注: 不同小写字母代表差异显著, $P<0.05$, 图 4~图 6 同。

与 CK 相比, 加速干燥阶段 US、US-BL、US-FT 样品水分比分别下降了 31.00%、46.11% 和 59.78%, 干燥速率分别增加了 50.74%、53.12% 和 70.60%。而降速干燥阶段 US、US-BL、US-FT 样品水分比分别下降了 8.57%、42.86% 和 57.14%, 干燥速率分别增加了 24.05%、30.64% 和 62.38%。这可能是由于超声波“空化”效应使细胞结构破损, 烫漂软化细胞壁并增加膜通透性, 而冻融进一步加剧了细胞结构破损, 导致水分迁移通道增加, 提高了水分扩散和蒸发速率[21,31]。这进一步证实干燥速率的提升是辣椒真空脉动干燥时间缩短、能耗比降低的主要原因, 且 US-FT 作用效果最好。

综上, US、US-BL 和 US-FT 有效提高了真空脉动干燥辣椒干燥速率, 且 US-FT 效果最好, 其次是 US-BL, 且干燥各阶段干燥效率均有提高。

## 2.2 预处理对真空脉动干燥辣椒细胞结构的影响

2.2.1 微观结构 所有样品的 SEM 结果如图 2 所示。CK(图 2A)样品中的大多数内部细胞饱满且形状相似、排列分布规整、细胞轮廓明显, 未受到外界物理或化学处理的破坏, 这是由于细胞壁和细胞膜结构完整, 细胞壁中的果胶和半纤维素分子紧密连接在一起, 维持了细胞的原有形状[30]。与 CK 相比, US 样品(图 2B)的细胞壁变薄、细胞间隙增加, 这是由于超声波空化效应产生的高速微射流和剪切力破坏细胞壁纤维素网络, 导致纤维素-果胶复合物结构发生断裂, 进而引起细胞壁局部变薄并形成了更多细胞间孔和微通道, 同时增强了水分子在细胞壁间的扩散能力; US-BL 样品(图 2C)部分细胞结构破损、细胞壁

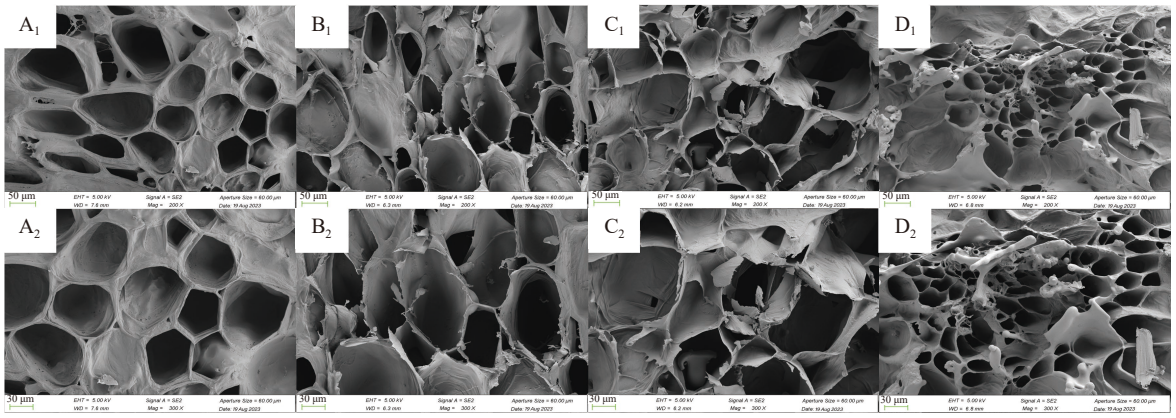



图 2 预处理对微观结构的影响

Fig.2 Effect of pretreatment on the microstructure

注: 下标 1、2 分别表示放大倍数为 200×和 300×的显微照片; $A_1$~$A_2$: CK; $B_1$~$B_2$: US; $C_1$~$C_2$: US-BL; $D_1$~$D_2$: US-FT。

塌陷，使组织结构孔洞增加、细胞间隙增大，这是由于超声波空化效应与烫漂对组织软化的共同作用加剧了细胞壁中果胶和纤维素等大分子物质解聚，导致部分细胞壁垮塌以及细胞结构发生不可逆破损，松散的结构进一步提升了水分子的扩散速率[31−33]。而 US-FT 样品（图 2D）细胞结构完全破损，形成了密集的多孔结构，这是由于超声波空化效应与冻融过程中冰晶膨胀的共同作用促进细胞壁中果胶和纤维素降解重排，导致细胞壁和细胞膜完全被破坏、细胞结构发生不可逆破裂，细胞壁结构完整性的丧失加速了细胞内外水分的重新分布；同时，超声波空化产生的微射流促使冻融过程形成更均匀的冰晶，这种均匀的冰晶膨胀力对细胞壁的破坏具有方向一致性，进而形成较为规则的多孔结构[33]。结果与 2.1.2 分析相一致，证实不同预处理使辣椒细胞结构发生了不同程度破损、细胞膜通透性增加，导致水分迁移通道增加，提高水分扩散速率，是辣椒干燥效率提高的主要原因，US-FT 样品细胞结构破损程度最大，干燥效率最高，这与 Feng 等[34] 研究结果相一致。

2.2.2　水分分布　果蔬内部不同水分状态的分布情况可以通过核磁共振（NMR）横向弛豫时间 $T_2$ 来表征。与细胞壁中果胶、纤维素等大分子通过强氢键紧密结合的结合水弛豫时间 $T_{21}$ 集中在 1~10 ms，分布于细胞质和细胞间隙中不易流动水弛豫时间 $T_{22}$ 集中在 10~100 ms，存在于液泡中的自由水弛豫时间 $T_{23}$ 大于 100 ms，流动性最强，氢质子自由度最高[35]。

干燥前所有样品的 $T_2$ 型反演光谱、弛豫时间（$T_{21}$、$T_{22}$、$T_{23}$）和对应相对峰面积（$A_{21}$、$A_{22}$、$A_{23}$）如图 3、表 1 所示。由图 3、表 1 可知，与 CK 相比，处理组样品弛豫峰整体呈现出向左移动的趋势，即 $T_2$ 弛豫时间变短，且 US 样品的结合水峰面积 $A_{21}$ 和自由水峰面积 $A_{23}$ 减小、不易流动水峰面积 $A_{22}$ 增加，而 US-BL 和 US-FT 样品的结合水峰面积 $A_{21}$ 和不易流动水峰面积 $A_{22}$ 增加、自由水峰面积 $A_{23}$ 减小，表明水分的整体流动性减弱，自由水含量降低、不易流动水增加。这是由于预处理增强了果胶、纤维素等大分子与水分子间的强氢键结合，导致结合水含量增加，同时减弱了细胞质和细胞间隙中水分的流动性，使更多水分从自由态转化为结合态和不易流动态，从而改变了辣椒水分分布状态[18,36]。这与 2.1 和 2.2.1 中得出水分迁移能力增强是导致辣椒干燥效率提升这一结论相反，说明水分分布状态的改变不是辣椒干燥效率提升的主要原因。

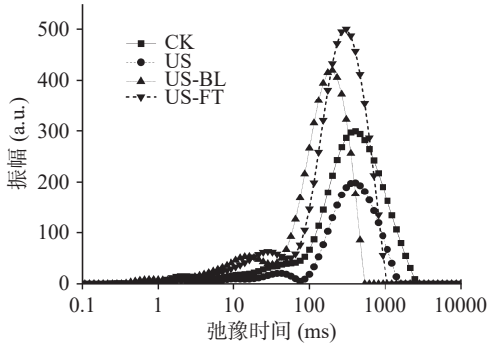



图 3　预处理对水分分布的影响

Fig.3　Effect of pretreatment on water distribution

综上，辣椒干燥速率提高主要归因于细胞结构破损和细胞膜通透性的增加，与干燥前辣椒水分分布变化无关；其中 US-FT 样品细胞结构破损程度最大，因而干燥速率最高。

### 2.3　预处理对真空脉动干燥辣椒物理性质的影响

2.3.1　色泽的分析　色泽是用来评判果蔬干制品品质优劣的重要指标之一。其中，$L^*$ 代表亮度，$a^*$ 代表红绿度，$b^*$ 代表黄蓝度，而 $\Delta E$ 用于衡量整体色泽的变化，$\Delta E$ 大于 3 可明显辨别色泽差异；$L^*$ 值升高样品色泽变亮、降低样品色泽变暗，$a^*$ 值升高样品色泽变红、$b^*$ 值升高样品色泽变黄[37]。所有样品的色泽，如表 2 所示。由表 2 可知，与 CK 相比，US 样品的 $L^*$ 值变化不显著，而 US-BL 和 US-FT 样品的 $L^*$ 值均

表 1　不同预处理辣椒的弛豫时间和相对面积

Table 1　Relaxation time and relative area of chili peppers in different pretreatments

| 样品 | $T_2$弛豫时间（ms） | | | $A_2$相对面积（%） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{21}$ | $T_{22}$ | $T_{23}$ | $A_{21}$ | $A_{22}$ | $A_{23}$ |
| CK | 1.72±0.04$^b$ | 32.10±0.45$^d$ | 973.73±0.02$^a$ | 0.05±0.00$^c$ | 1.65±0.02$^d$ | 98.32±0.03$^a$ |
| US | 1.29±0.01$^c$ | 34.38±0.02$^c$ | 735.53±1.11$^b$ | 0.04±0.00$^d$ | 1.91±0.04$^c$ | 98.05±0.01$^b$ |
| US-BL | 1.71±0.13$^b$ | 74.16±0.03$^a$ | 528.62±2.05$^c$ | 0.06±0.00$^b$ | 2.38±0.05$^b$ | 97.58±0.02$^c$ |
| US-FT | 4.41±0.01$^a$ | 67.43±0.02$^b$ | 281.11±0.48$^d$ | 0.17±0.00$^a$ | 8.24±0.03$^a$ | 91.59±0.03$^d$ |

注：同列不同小写字母代表差异显著，$P$<0.05，表2同。

表 2　不同预处理辣椒的色泽

Table 2　Colour of chili peppers in different pretreatments

| 样品 | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\Delta E$ |
|---|---|---|---|---|
| CK | 42.02±2.15$^b$ | 34.22±0.70$^a$ | 27.96±0.73$^b$ | – |
| US | 41.26±1.39$^b$ | 31.57±0.93$^b$ | 28.04±1.14$^b$ | 3.67±1.03$^b$ |
| US-BL | 48.33±0.55$^a$ | 34.37±0.38$^a$ | 31.98±0.58$^a$ | 5.44±2.06$^a$ |
| US-FT | 46.46±0.03$^a$ | 30.77±0.52$^b$ | 29.27±0.73$^a$ | 4.76±2.76$^b$ |

显著升高($P$<0.05)；US 和 US-FT 样品的 $a^*$值显著降低($P$<0.05)，而 US-BL 样品 $a^*$值变化不显著；US 样品的 $b^*$值变化不显著，而 US-BL 和 US-FT 样品的 $b^*$值均显著升高($P$<0.05)。表明 US 样品红色变浅，而 US-BL 和 US-FT 样品色泽变红变亮，且与 CK 样品色泽差异肉眼可识别。这是由于不同预处理不同程度破坏了细胞结构(见图 2)，促进了细胞内辣椒红素、$V_C$、多酚等物质与氧的接触发生氧化反应，而干燥时间的缩短(见图 1A)，又抑制了氧化反应的进程，致使样品色泽的差异[34]。

2.3.2　质构的分析　所有样品的硬度和咀嚼性如图 4(A、B)所示。与 CK 相比，处理组硬度、咀嚼性均显著降低($P$<0.05)，US、US-BL 和 US-FT 硬度分别降低了 29.70%、37.45% 和 44.21%，咀嚼性分别降低了 33.56%、49.26% 和 54.26%。表明 US、US-BL 和 US-FT 预处理均显著改变了样品的质构特性，且 US-BL 和 US-FT 的作用效果更为明显。结合微观结构(图 2)进行分析，这是由于超声波空化效应导致细胞刚性下降、支撑力减弱以及部分细胞垮塌，从而使硬度和咀嚼性显著降低，在 US 处理的基础上，烫漂进一步增加了细胞壁孔隙率并降低了细胞孔密度，加剧了硬度和咀嚼性的下降，而冻融使细胞结构

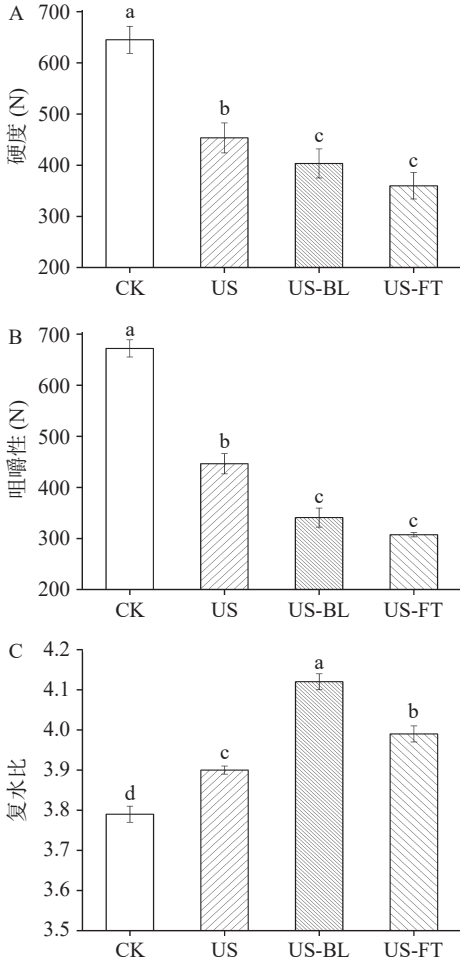



图 4　预处理对硬度(A)、咀嚼性(B)及复水比(C)的影响

Fig.4　Effect of pretreatment on hardness (A), chewiness (B), and rewater ratio (C)

塌陷更加明显，几乎无完整的细胞结构，导致 US-FT 硬度和咀嚼性最低[38]。这与 Li 等[39] 的研究结果一致。

2.3.3　复水比的分析　所有样品的复水比如图 4(C)所示。由图 4(C)可知，与 CK 相比，处理组样品的复水比均显著提高($P$<0.05)，US、US-BL 和 US-FT 的复水比分别提高了 2.87%、8.58%、5.26%，US-BL 的复水效果最好。这是由于超声波空化效应在辣椒中形成微观通道，烫漂进一步诱导细胞壁和细胞膜结构变化促进了多孔结构的形成，有助于水分填充，从而提高了再水化能力，而 US-FT 对辣椒内部结构破坏程度较高，不能维持原有的持水能力，导致复水比相对较低[40−41]，这也与所有样品微观结构表征结果一致(见 2.2.1)。因此，孔隙率增大和微观通道的形成是辣椒复水比提升的主要原因。

综上，US-BL 处理可使辣椒色泽、质构和复水比得到最大的改善，与 CK 相比，$L^*$值、$a^*$值、复水比分别增加了 15.02%、0.44% 和 8.58%，而硬度和咀嚼性分别降低了 37.45%、49.26%。

### 2.4　预处理对真空脉动干燥辣椒化学性质的影响

2.4.1　辣椒红素含量的分析　辣椒红素是辣椒中关键的呈色物质，主要分布于红辣椒的外皮中，是评价辣椒品质的重要指标。所有样品辣椒红素含量，如图 5(A)所示。与 CK 相比，US 和 US-FT 样品辣椒红素含量显著降低($P$<0.05)，分别降低 6.25%、18.75%，而 US-BL 样品辣椒红素含量无显著变化，这与 $a^*$值的变化趋势一致(表 2)，也说明样品 $a^*$值的变化与辣椒红素含量相关。US-BL 样品中辣椒红素变化不明显，主要归因于烫漂处理使生物活性酶失活，抑制了辣椒红素的酶促氧化降解。同时，烫漂破坏了辣椒细胞壁和细胞膜的结构，促进了辣椒红素与蛋白复合物的解离，从而提高了其可提取率[37]。相比之下，US-FT 样品中辣椒红素的损失最大，这是因为冻融处理严重破坏了辣椒表皮结构，导致组织失去对细胞内化合物的保护能力，进而加速了辣椒红素的降解。Tumer 等[41] 研究发现，冻融处理会导致番茄红素的显著降解，这与细胞结构的破坏和氧化反应的增强密切相关。US-FT 样品中 $V_C$(图 5D)和多酚(图 5E)含量的降低也证实了这一点。

2.4.2　辣椒素类物质含量的分析　辣椒素类物质是辣椒属独有的成分，其中辣椒素和二氢辣椒素约占辣椒素类物质总量的 90%，是辣椒中的主要辣味物质。所有样品辣椒素和二氢辣椒素含量，如图 5(B、C)所示。与 CK 相比，所有样品中的辣椒素和二氢辣椒素都显著增加($P$<0.05)，US、US-BL 和 US-FT 样品辣椒素含量分别增加了 28.68%、28.68% 和 55.04%，二氢辣椒素含量分别增加了 25.84%、31.46% 和 64.04%。这是由于 US 通过空化效应破坏细胞壁，促进辣椒素和二氢辣椒素释放，烫漂进一步软化细胞壁中的果胶和半纤维素，加强了细胞结构破坏程度，

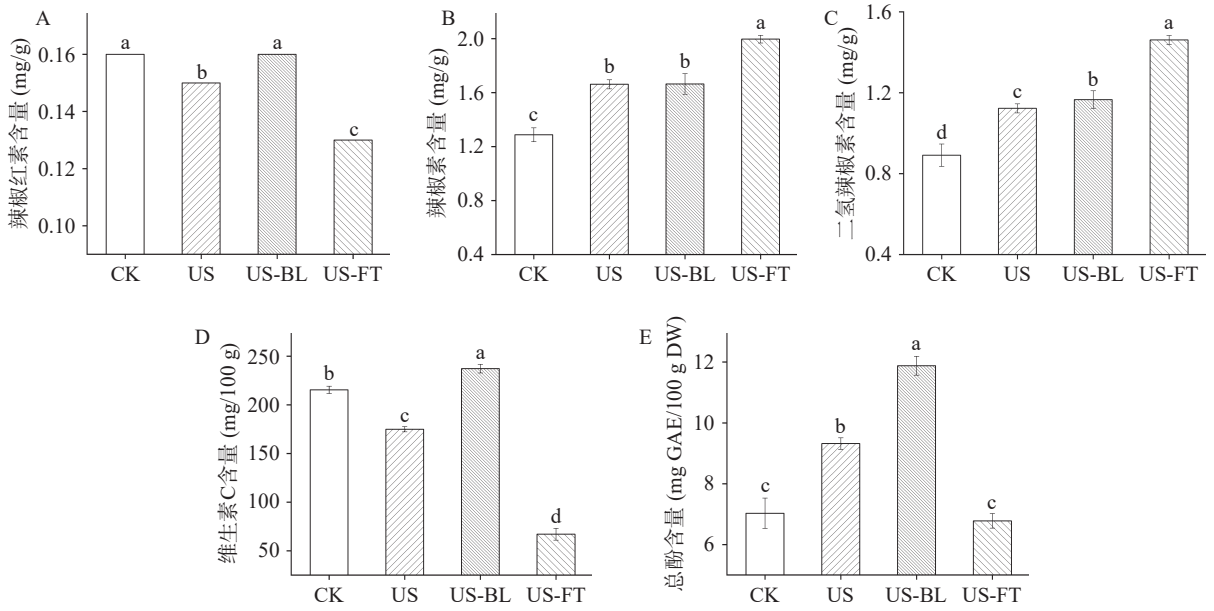



图 5　预处理对辣椒红素(A)、辣椒素(B)、二氢辣椒素(C)、维生素 C(D)和总酚(E)含量的影响

Fig.5　Effect of pretreatment on the content of capsorubin (A), capsaicin (B), dihydrocapsaicin (C), vitamin C (D) and total phenols (E)

进一步提高提取效率，而 US-FT 使细胞结构破坏最严重，更有利于辣味物质的解离，导致辣味物质的释放量增加[23,42]。从微观结构表征分析也能证实这一原因。

2.4.3　$V_C$ 含量的分析　$V_C$ 是辣椒干制品的重要抗氧化成分。所有样品 $V_C$ 含量，如图 5(D)所示。与 CK 相比，US-BL 样品 $V_C$ 含量显著增加($P$<0.05)，增加了 10.10%，而 US 和 US-FT 样品 $V_C$ 含量显著降低($P$<0.05)，分别降低了 18.82%、68.87%。这是由于 US 导致辣椒中自由基大量积累，加速了 $V_C$ 的氧化，从而导致 $V_C$ 含量下降，烫漂处理使抗坏血酸氧化酶失活，减少了 $V_C$ 的降解，从而在干燥中更好地保留 $V_C$，US-FT 样品中 $V_C$ 含量最低，主要因为冻融过程中冰晶的生长对细胞壁、中间薄层和原生质体造成了不可逆的损伤，促使 $V_C$ 与氧接触氧化，且部分从辣椒中流失[31,43]。

2.4.4　总酚含量的分析　酚类物质也是辣椒重要的抗氧化活性成分。所有样品总酚含量，如图 5(E)所示。与 CK 相比，US 和 US-BL 样品总酚含量显著增加($P$<0.05)，分别增加了 32.52% 和 68.90%，而 US-FT 样品降低了 3.58%($P$>0.05)。这是因为 US 促使共价键断裂和细胞膜破裂，从而加速了与淀粉和蛋白质基质结合的酚类物质的释放。研究表明，US 引起的酚类含量增加不仅与细胞壁结构的分解有关，还与果蔬中过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)和超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)等抗氧化酶活性的变化密切相关，这些酶活性的改变进一步调控了酚类物质的合成与积累[44]。US-BL 样品的总酚含量最高，达到 11.88 mg GAE/100 g，这主要归因于高温条件下多酚氧化酶的 $\alpha$-螺旋结构被抑制并发生不可逆变化，从而减弱了其催化的降解反应；同时，烫漂处理破坏了细胞结构，使细胞壁果胶网络变得松散，进一步提升了酚类物质的提取效率。相比之下，US-FT 对辣椒细胞结构造成了严重破坏，在解冻过程中多酚类物质与氧接触氧化，且部分随汁液流失而明显减少[25]。Chen 等[45] 对蓝莓干对比发现，较鲜果相比，冻融处理后酚类物质保留率较低。

综上，US-BL 可使辣椒中辣椒红素、辣椒素、二氢辣椒素、$V_C$ 和总酚含量得到最大程度的保留或释放，与 CK 相比，辣椒红素保留率达到 100%，而辣椒素、二氢辣椒素、$V_C$ 和总酚含量分别增加了 28.68%、31.46%、10.10%、68.90%。

### 2.5　预处理对真空脉动干燥辣椒抗氧化活性的影响

抗氧化性反映了果蔬干制品清除自由基、延缓氧化反应的能力。所有样品的抗氧化活性用 DPPH 自由基清除能力和 T-AOC 总抗氧化能力表示，结果如图 6 所示。由图 6 可知，预处理对样品 T-AOC 总抗氧化能力与 DPPH 自由基清除能力影响一致，与 CK 相比，US 和 US-BL 样品的 DPPH 自由基清除能力和总抗氧化能力显著增加，US-FT 样品的显著降低($P$<0.05)。US 样品 DPPH 自由基清除能力、总抗氧化能力分别增加了 6.26%、16.12%，US-BL 样品分别增加了 14.11%、70.45%，US-FT 样品分别降低 20.70%、33.04%。这主要是由于 US 促进了酚类、黄酮等抗氧化物质的释放，从而提高了抗氧化能力，烫漂处理在抑制多酚氧化酶活性的同时增强了对细胞壁的破坏程度，减少了抗氧化物质的降解，使更多抗氧化物质得以释放，而 US-FT 使辣椒细胞破坏严重，抗氧化物质与氧接触降解，且部分抗氧化物质随汁液流失，从而导致了抗氧化能力的降低[26,46]。

综上，US 和 US-BL 有效提高了真空脉动干燥辣椒的抗氧化活性，且 US-BL 样品抗氧化活性最高。

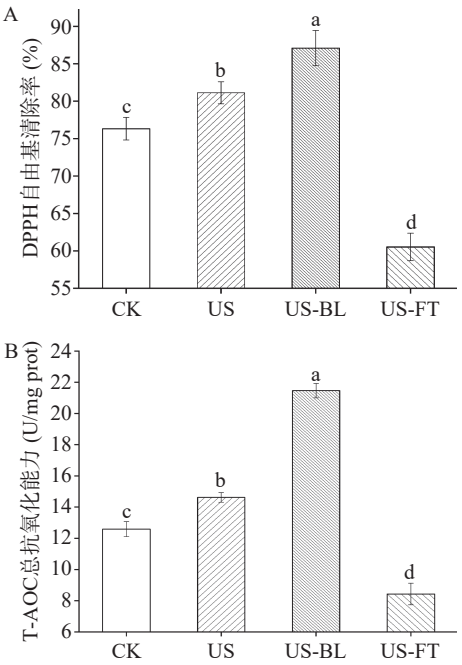



图 6　预处理对 DPPH 自由基清除能力(A)和总抗氧化能力(B)的影响

Fig.6　Effect of pretreatment on DPPH radical scavenging capacity (A) and total antioxidant capacity (B)

### 2.6　预处理对真空脉动干燥辣椒挥发性成分的影响

2.6.1　挥发性风味物质(Volatile flavor substances, VOCs)的鉴定　通过 GC-MS 对所有样品中的 VOCs 进行了鉴定分析,结果如表 3 所示。所有样品中共定性出 46 种化合物,包括酯类 14 种、醛类 13 种、醇类 12 种、萜烯类 4 种、其他类 2 种(呋喃、吡嗪)和酮类 1 种。由表 3 可知,CK、US、US-BL、US-FT 样品挥发性成分总含量分别为 249.73、8.80、193.64、2.06 μg/g,与 CK 相比,处理组样品挥发性成分显著减少($P$<0.05),尤其是 US、US-FT 样品挥发性成分大幅度减少。表明 US-BL 更有利于总挥发性物质保留,而 US、US-FT 不利于真空脉动辣椒总挥发性物质的保留。这可能归因于 US、US-FT 使细胞组织结构破坏,干燥过程中挥发性物质更容易损失,烫漂使生物活性酶失活,抑制了干燥过程辣椒红素、酚类、维生素类等氧化反应,从而减少了由氧化反应生成的挥发性物质的损失[27,47]。

酯类、醛类和萜烯类物质是辣椒香气的重要组成部分,酯类具有果香与花香,醛类具有果香、焦糖香与坚果香的混合香气,而萜烯类具有辛香和刺激性气味。由表 3 可知,与 CK 相比,US、US-FT 样品酯类物质总含量分别降低了 94.33%、99.03%,醛类物质总含量分别降低了 96.31%、94.95%,萜烯类物质总含量分别降低了 54.55%、98.64%,而 US-BL 样品酯类、醛类和萜烯类物质总含量分别增加了 76.05%、29.70% 和 181.27%($P$<0.05)。US-BL 样品酯类总量主要增加的是异丁酸己酯、水杨酸甲酯等,醛类总量主要增加的是正己醛、苯乙醛等,萜烯类主要增加的是 $\beta$-紫罗兰酮和(-)-柠檬烯,这主要归因于烫漂促进酯化与美拉德反应生成更多酯类、醛类和萜烯类物质,而 US 和 US-FT 氧化反应的加剧导致这些物质的损失[43,48]。这一结果与 2.2.1 分析相一致,证实细胞破损促进风味前体物质的释放与转化,而过度破损则加速氧化降解。

醇类具有柔和平衡的香气、酮类具有果香与奶油香、其他类物质(呋喃和吡嗪)具有烘烤香和坚果香,这些物质丰富了辣椒的整体香气。由表 3 可知,与 CK 相比,US、US-BL 和 US-FT 样品醇类、酮类和其他类物质的总含量显著降低($P$<0.05),醇类物质总含量分别降低了 99.26%、54.65%、99.90%,酮类物质的总含量在 US 样品中降低了 50.00%,而在 US-BL 和 US-FT 样品中则完全降解,其他类物质总含量分别降低了 96.48%、22.46%、99.18%($P$<0.05),主要是异戊醇、正戊醇、叶醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-正戊基呋喃和 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪物质的减少,归因于 US 破坏细胞结构加速了挥发性物质的挥发,烫漂使酶失活减少了风味前体物质的转化,而冻融过程中冰晶的形成进一步促进酮类和其他物质的损失[28,45]。这与 Wang 等[48] 研究的超声波辅助干燥对草莓挥发性成分影响的结论相一致。

2.6.2　VOCs 的含量和主成分分析　对所有样品中 VOCs 的含量进行分析,如图 7(A)所示。由图 7(A)可知,所有样品的挥发性成分种类相同,含量存在差异,其中醇类和醛类物质含量最高,酯类和萜烯类次之,酮类和其他类物质含量最少。CK 样品醇类、醛类、酯类和萜烯类物质占比分别为 73.80%、11.82%、9.05% 和 4.40%,以异戊醇、壬醛、4-甲基戊基 4-甲基戊酸酯和 $\beta$-紫罗兰酮为主;酮类和其他类物质占比分别为 0.01%、0.92%,以 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 2-正戊基呋喃为主。US 样品的各类物质组成与 CK 相似,占比略有不同,醇类、醛类、酯类和萜烯类物质占比均在 10% 以上,以正己醇、壬醛、顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯和 $\beta$-紫罗兰酮为主;酮类、其他类物质占比分别为 0.11%、0.68%,以 6-甲基-5-庚烯-2-酮和 2-正戊基呋喃为主。而 US-BL 和 US-FT 样品的各类物质组成相似,均以醇类、醛类、酯类和萜烯类为主,其他类物质占比相对较低,且不含酮类物质;但 US-FT 样品的总含量较 US-BL 样品更低。表明醇类、醛类、酯类及萜烯类物质的相对含量在所有样品中均达到最高,这是由于预处理过程中发生的氧化、糖苷水解、酯化等反应,使一些挥发性物质增加或损失,导致挥发性物质的含量有所差异,且 US-FT 细胞结构破坏更为严重,挥发性物质损失更多[46−49]。

对所有样品中 VOCs 进行主成分分析,如图 7(B)所示。由图 7(B)可知,PC1 贡献率为 51.0%,PC2 贡献率为 31.6%,累计贡献率为 82.6%。US-BL 样品与其他样品距离较远,差异主要在 PC2,表明 US-BL 样品 VOCs 与其余 3 种样品差异明显。

表 3　预处理对辣椒挥发性成分的影响

Table 3　Effects of pretreatment on the volatile components of the pepper

| 序号 | 保留时间（min） | 化合物名称 | CAS号 | 香型 | 含量(μg/g) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | CK | US | US-BL | US-FT |
| | | | 醇类 | | | | | |
| 1 | 7.24 | 异戊醇 | 123-51-3 | 发酵香 | 169.37±20.44$^{a}$ | – | – | 0.05±0.00$^{b}$ |
| 2 | 8.89 | 正戊醇 | 71-41-0 | 发酵香 | 0.02±0.00$^{a}$ | – | – | – |
| 3 | 13.39 | 正己醇 | 111-27-3 | 药草香 | 7±0.98$^{a}$ | 1.19±0.22$^{b}$ | – | 0.07±0.00$^{c}$ |
| 4 | 12.78 | 叶醇 | 928-96-1 | 青草香 | 0.07±0.01$^{a}$ | – | – | – |
| 5 | 8.50 | 2-己醇 | 626-93-7 | 酒香 | 1.64±0.40$^{b}$ | 0.02±0.00$^{c}$ | 74.18±3.00$^{a}$ | – |
| 6 | 28.41 | L-薄荷醇 | 2216-51-5 | 薄荷香 | 0.02±0.00$^{a}$ | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – |
| 7 | 44.94 | 反式-橙花叔醇 | 40716-66-3 | 花香 | 7.18±0.12$^{b}$ | – | 9.40±0.19$^{a}$ | – |
| 8 | 12.54 | 3-己烯-1-醇 | 544-12-7 | 青草香 | 1.5±0.03$^{a}$ | 0.04±0.00$^{b}$ | – | 0.04±0.00$^{b}$ |
| 9 | 18.80 | 1-庚烯-3-醇 | 4938-52-7 | 青草香 | – | – | – | 0.01±0.00$^{a}$ |
| 10 | 18.91 | 2-壬烯-1-醇 | 22104-79-6 | 脂香 | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – | – |
| 11 | 21.39 | 2-乙基己醇 | 104-76-7 | 柑橘香 | 1.81±0.03$^{a}$ | 0.06±0.00$^{b}$ | – | 0.02±0.00$^{b}$ |
| 12 | 42.82 | 反-2-十三烯醇 | 74962-98-4 | 蜡香 | 0.06±0.00$^{a}$ | 0.04±0.00$^{a}$ | – | – |
| | | 小计 | | | 184.30±22.03$^{a}$ | 1.36±0.34$^{c}$ | 83.58±3.19$^{b}$ | 0.19±0.00$^{c}$ |
| | | | 醛类 | | | | | |
| 13 | 3.48 | 异丁醛 | 78-84-2 | 醛香 | – | – | – | 0.16±0.00$^{a}$ |
| 14 | 4.92 | 异戊醛 | 590-86-3 | 醛香 | 0.87±0.02$^{a}$ | 0.06±0.00$^{b}$ | – | 0.28±0.00$^{b}$ |
| 15 | 5.11 | 2-甲基丁醛 | 96-17-3 | 可可香 | – | – | – | 0.12±0.00$^{a}$ |
| 16 | 5.67 | 正戊醛 | 110-62-3 | 发酵香 | 0.37±0.02$^{a}$ | 0.02±0.00$^{b}$ | – | – |
| 17 | 10.03 | 正己醛 | 66-25-1 | 青草香 | 7.56±0.10$^{b}$ | 0.33±0.06$^{c}$ | 15.14±1.00$^{a}$ | 0.1±0.00$^{c}$ |
| 18 | 12.53 | 2-已烯醛 | 6728-26-3 | 青草香 | 1.86±0.09$^{a}$ | 0.06±0.00$^{b}$ | – | – |
| 19 | 14.84 | 庚醛 | 111-71-7 | 青草香 | 2.16±0.13$^{b}$ | 0.15±0.00$^{c}$ | 3.71±0.54$^{a}$ | 0.03±0.00$^{c}$ |
| 20 | 15.21 | 3-甲硫基丙醛 | 3268-49-3 | 蔬菜香 | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – | 0.07±0.00$^{a}$ |
| 21 | 17.89 | 苯甲醛 | 100-52-7 | 果香 | – | – | – | 0.03±0.00$^{a}$ |
| 22 | 20.00 | 正辛醛 | 124-13-0 | 醛香 | 2.07±0.12$^{a}$ | 0.07±0.00$^{b}$ | – | 0.02±0.00$^{b}$ |
| 23 | 22.11 | 苯乙醛 | 122-78-1 | 青草香 | 4.38±1.12$^{b}$ | 0.11±0.00$^{c}$ | 8.28±0.77$^{a}$ | 0.56±0.00$^{c}$ |
| 24 | 25.05 | 壬醛 | 124-19-6 | 醛香 | 9.40±1.04$^{b}$ | 0.29±0.01$^{c}$ | 11.17±1.10$^{a}$ | 0.12±0.00$^{c}$ |
| 25 | 38.76 | 十二醛 | 112-54-9 | 醛香 | 0.85±0.09$^{a}$ | – | – | – |
| | | 小计 | | | 29.53±2.74$^{b}$ | 1.09±0.07$^{c}$ | 38.3±3.41$^{a}$ | 1.49±0.00$^{c}$ |
| | | | 酯类 | | | | | |
| 26 | 10.92 | 乙酸丁酯 | 123-86-4 | 醚香 | – | 0.04±0.00$^{a}$ | – | – |
| 27 | 14.21 | 己酸-2-苯乙酯 | 6290-37-5 | 花香 | – | 0.04±0.00$^{a}$ | – | – |
| 28 | 25.47 | 异丁酸己酯 | 2349-07-7 | 青草香 | 2.12±0.33$^{b}$ | – | 4.90±0.87$^{a}$ | – |
| 29 | 26.72 | 戊酸庚酯 | 5451-80-9 | 果香 | – | 0.02±0.00$^{a}$ | – | – |
| 30 | 29.43 | 水杨酸甲酯 | 119-36-8 | 薄荷香 | 4.12±0.11$^{b}$ | 0.27±0.08$^{c}$ | 11.45±2.05$^{a}$ | 0.13±0.00$^{c}$ |
| 31 | 31.29 | 顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯 | 53398-85-9 | 青草香 | 1.74±0.50$^{a}$ | 0.81±0.03$^{b}$ | – | – |
| 32 | 30.75 | 壬酸甲酯 | 1731-84-6 | 果香 | 1.87±0.14$^{a}$ | – | – | – |
| 33 | 31.11 | 异戊酸叶醇酯 | 35154-45-1 | 青草香 | 1.83±0.10$^{a}$ | 0.03±0.00$^{b}$ | – | – |
| 34 | 32.04 | 正戊酸己酯 | 1117-59-5 | 果香 | 2.56±0.03$^{b}$ | 0.05±0.00$^{c}$ | 6.89±1.78$^{a}$ | – |
| 35 | 34.74 | 4-甲基戊基4-甲基戊酸酯 | 35852-42-7 | 果香 | 6.24±1.20$^{b}$ | – | 13.79±0.90$^{a}$ | 0.08±0.00$^{c}$ |
| 36 | 36.30 | 己酸己酯 | 6378-65-0 | 青草香 | 1.44±0.03$^{b}$ | – | 2.74±0.50$^{a}$ | 0.01±0.00$^{c}$ |
| 37 | 46.54 | 癸酸异戊酯 | 2306-91-4 | 蜡香 | 0.66±0.01$^{a}$ | 0.01±0.00$^{b}$ | – | – |
| 38 | 57.45 | 棕榈酸甲酯 | 112-39-0 | 蜡香 | 0.01±0.00$^{a}$ | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – |
| 39 | 64.78 | 油酸乙酯 | 111-62-6 | 脂香 | – | 0.02±0.00$^{a}$ | – | – |
| | | 小计 | | | 22.59±2.45$^{b}$ | 1.28±0.11$^{c}$ | 39.77±6.10$^{a}$ | 0.22±0.00$^{c}$ |
| | | | 酮类 | | | | | |
| 40 | 19.29 | 6-甲基-5-庚烯-2-酮 | 110-93-0 | 柑橘香 | 0.02±0.00$^{a}$ | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – |
| | | 小计 | | | 0.02±0.00$^{a}$ | 0.01±0.00$^{a}$ | 0±0.00$^{b}$ | 0±0.00$^{b}$ |
| | | | 萜烯类 | | | | | |
| 41 | 39.64 | *α*-紫罗酮 | 127-41-3 | 花香 | 1.34±0.32$^{a}$ | 0.02±0.00$^{b}$ | – | 0.01±0.00$^{b}$ |
| 42 | 42.00 | *β*-紫罗兰酮 | 14901-07-6 | 花香 | 9.32±2.30$^{b}$ | 4.77±0.67$^{b}$ | 26.52±5.80$^{a}$ | – |
| 43 | 40.08 | *β*-二氢紫罗兰酮 | 17283-81-7 | 木香 | 0.16±0.03$^{a}$ | 0.01±0.00$^{a}$ | – | – |

**续表 3**

| 序号 | 保留时间（min） | 化合物名称 | CAS号 | 香型 | 含量(μg/g) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | CK | US | US-BL | US-FT |
| 44 | 21.21 | (-)-柠檬烯 | 5989-54-8 | 萜烯 | 0.18±0.07$^{b}$ | 0.20±0.03$^{b}$ | 4.42±0.99$^{a}$ | 0.14±0.04$^{b}$ |
| | | 小计 | | | 11.00±2.72$^{b}$ | 5.00±0.70$^{c}$ | 30.94±6.79$^{a}$ | 0.15±0.04$^{d}$ |
| | | | 其他类 | | | | | |
| 45 | 19.38 | 2-正戊基呋喃 | 3777-69-3 | 果香 | 1.69±0.51$^{a}$ | 0.04±0.00$^{b}$ | – | – |
| 46 | 28.78 | 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪 | 24683-00-9 | 青草香 | 0.60±0.02$^{b}$ | 0.02±0.00$^{c}$ | 1.05±0.14$^{a}$ | 0.01±0.00$^{c}$ |
| | | 小计 | | | 2.29±0.53$^{a}$ | 0.06±0.00$^{c}$ | 1.05±0.14$^{b}$ | 0.01±0.00$^{c}$ |
| | | 总计 | | | 249.73±30.47$^{a}$ | 8.80±1.22$^{c}$ | 193.64±19.63$^{b}$ | 2.06±0.04$^{c}$ |

注: “–”表示未检测到; 同行不同小写字母代表差异显著, $P<0.05$。

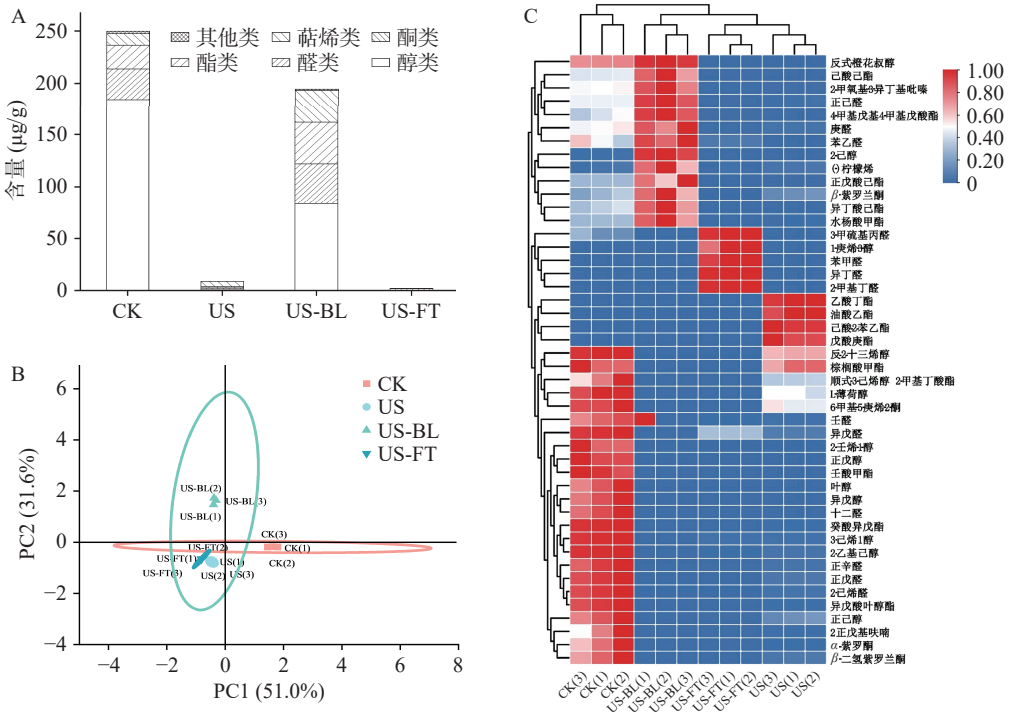



图 7 VOCs 含量(A)、主成分分析(B)和聚类热图(C)

Fig.7 VOCs content (A), principal component analysis (B) and clustering heat map (C)

而 US-FT 和 US 样品距离较近, 说明这 2 种样品的风味成分较相似, 但仍各自成组, 差异主要体现在 PC1。因此, 使用 GC-MS 技术结合 PCA 可以将不同处理组的样品准确地判别区分。

2.6.3 VOCs 层次聚类分析 通过层次聚类分析(Hierarchical clustering analysis, HCA)对所有样品挥发性风味物质的差异进行了更直观的分析, 结果如图 7(C)所示。对所有样品中同一种挥发性成分的含量进行标准化处理, 颜色强度从最大值(红色)到最小值(蓝色)不等, 与挥发性成分的含量分布一致。由图 7(C)可知, 由 HCA 的列聚类可看出, 所有样品均有其特征性的挥发性成分。CK 样品含有较多的顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯、2-正戊基呋喃、$\alpha$-紫罗酮、$\beta$-二氢紫罗兰酮、2-壬烯-1-醇等物质; US 样品含有较多的己酸-2-苯乙酯、戊酸庚酯和乙酸丁酯等物质; US-FT 样品含有较多的 3-甲硫基丙醛、1-庚烯-3-醇、苯甲醛、异丁醛和 2-甲基丁醛等物质; 而 US-BL 样品的挥发性物质含量与 US 和 US-FT 样品有明显差别, 且与 CK 样品相似, 含有较多的醇类、醛类、酯类和其他类物质, 例如 2-己醇、(-)-柠檬烯、$\beta$-紫罗兰酮、异丁酸己酯、水杨酸甲酯、己酸己酯、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪、正己醛、4-甲基戊基 4-甲基戊酸酯、庚醛、苯乙醛和正戊酸己酯等。表明 US-BL 较 US 和 US-FT 样品更有利于挥发性成分保留, 这是因为不同预处理过程中发生化学反应使部分挥发性物质(如酯类、醛类和萜烯类)通过酯化、氧化和美拉德反应等途径生成或释放, US 导致部分挥发性物质降解、US-FT 导致挥发性成分大量损失, 而 US-BL 减少了挥发性成分的损失, 且烫漂过程促进辣椒红素降解形成了更多美拉德反应产物[47,49−50], 这也与 2.6.1 分析结果相一致。

综上, 4 种辣椒样品的特征风味物质组成差异明显, 与 PCA 分析一致; 且 US-BL 有利于真空脉动辣椒酯类、醛类和萜烯类等挥发性物质的保留。

## 2.7 辣椒品质与挥发性成分的相关性分析

通过 2.6 节发现, 所有样品挥发性成分丰度有显

著差异（$P$<0.05），本节通过 Pearson 相关性分析，进一步探讨辣椒的挥发性成分与关键品质指标的相互关系（$|r|$>0.5，$P$≤0.05），为了保证结果的可比性和稳定性，选择了处理组共有的 7 种挥发性成分与关键品质指标进行相关性分析，如图 8 所示。由图 8 可知，这些挥发性成分与辣椒的色泽、$V_C$ 和辣椒红素等呈现较强相关性。正己醛、庚醛、苯乙醛、壬醛、水杨酸甲酯和 2-甲氧基-3-异丁基吡嗪与 $a^*$值、$V_C$ 和辣椒红素均呈高度正相关（$P$≤0.05），$a^*$值与这些成分的相关系数为 0.77~0.90，$V_C$ 的相关系数为 0.74~0.82，辣椒红素的相关系数为 0.68~0.83。高相关性表明 $a^*$值、$V_C$ 和辣椒红素含量越高，醛类和酯类含量也越高，这一结果是由于预处理过程部分挥发性成分具有抗氧化活性，从而保护 $a^*$值、$V_C$ 和辣椒红素免受氧化降解，从而维持了较高的含量。壬醛与辣椒素、二氢辣椒素呈现显著负相关（$P$≤0.05），相关系数分别为−0.63 和−0.59，表明辣椒素和二氢辣椒素含量越低，壬醛含量越高，这是因为预处理过程壬醛通过氧化反应消耗了辣椒素和二氢辣椒素的前体物质，从而抑制二者合成途径；而预处理通过破坏细胞结构提高了辣椒素和二氢辣椒素的溶出效率，所以二者的最终含量仍呈现上升趋势[34,51−52]。

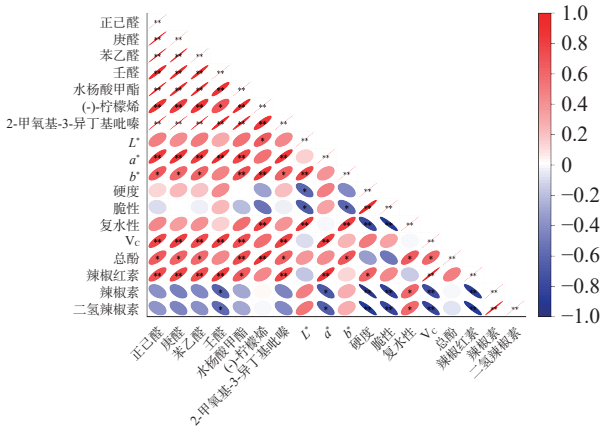



图 8　挥发性成分与品质的相关性分析

Fig.8　Correlation analysis of volatile components and quality

注：图中“*”表示指标间存在统计学的显著性差异，*$P$≤0.05，**$P$≤0.01。

综上所述，辣椒关键品质指标与挥发性成分有良好的线性关系，醛类和酯类成分与辣椒色泽、$V_C$ 和辣椒红素含量呈高度正相关（$P$≤0.05），而壬醛与辣椒素和二氢辣椒素含量呈显著负相关（$P$≤0.05）。

## 3　结论

本研究探究了 US、US-BL 及 US-FT 对真空脉动干燥辣椒干燥特性、物理性质、化学性质及挥发性成分的影响。结果表明，US、US-BL、US-FT 显著降低了真空脉动干燥辣椒的干燥时间和能耗比，各阶段干燥速率都有所提高，且有效改善了样品理化品质和风味，US-BL 作用效果最佳，样品干燥时间缩短 29.15%、能耗比降低 39.19%，综合品质明显改善，颜色更红，硬度和咀嚼性分别降低 37.45% 和 49.26%，化学活性成分保留最好，DPPH 自由基清除能力、总抗氧化能力分别增加了 14.11% 和 70.45%；通过微观结构和低场核磁共振分析揭示预处理使细胞组织结构破损是样品干燥时间缩短、能耗比降低的主要原因，而与水分分布的改变关系不大；挥发性成分分析表明，US-BL 更有利于样品挥发性成分的保留，醇类、醛类、酯类和萜烯类物质含量均显著高于 US 和 US-FT 样品。Pearson 相关性分析表明，醛类和酯类与 $a^*$值、$V_C$ 和辣椒红素含量呈正相关，而壬醛与辣椒素和二氢辣椒素含量呈负相关。综上所述，US-BL 不仅能有效缩短辣椒干燥时间、降低能耗比，还能改善辣椒的理化品质，更有利于辣椒红素、$V_C$ 和挥发性物质的保留。本研究将为推动新型制干技术应用于辣椒产业及提升辣椒干制品品质提供了理论与技术支撑。

© 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] GENG Zhihua, HUANG Xiao, WANG Jun, et al. Pulsed vacuum drying of pepper (*Capsicum annuum* L.): Effect of high-humidity hot air impingement blanching pretreatment on drying kinetics and quality attributes[J]. Foods, 2022, 11(3): 318.

[2] LI Cen, WU Yongjun, ZHU Qiyan, et al. Alterations in physico-chemical properties, microstructure, sensory characteristics, and volatile compounds of red pepper (*Capsicum annuum* var. *Conoides*) during various thermal drying durations[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101566.

[3] 陈佳妮, 刘广宇, 葛永辉, 等. 不同分切形状对贵州小黄姜真空冷冻干燥效率及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 138−145. [CHEN Jiani, LIU Guangyu, GE Yonghui, et al. Effects of different cutting shapes on the vacuum freeze-drying efficiency and quality of Guizhou *Zingiber officinale* Roscoe vacuum freeze-drying[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(1): 138−145.]

[4] XU Peng, PENG Xueyuan, YANG Junling, et al. Effect of vacuum drying and pulsed vacuum drying on drying kinetics and quality of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) slices[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): e16098.

[5] BEI Xingrui, YU Xiaojie, ZHOU Cunshan, et al. Improvement of the drying quality of blueberries by catalytic infrared blanching combined with ultrasound pretreatment[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138983.

[6] BASSEY E J, CHENG Junhu, SUN Dawen. Thermoultrasound and microwave-assisted freeze-thaw pretreatments for improving infrared drying and quality characteristics of red dragon fruit slices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 91: 106225.

[7] XU B G, SYLVAIN TILIWA E, YAN W Q, et al. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review[J]. Food Research International, 2022, 152: 110744.

[8] 张馨月. 超声预处理对冻干草莓品质及贮藏特性的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2024. [ZHANG Xinyue. Effect of ultrason-

ic pretreatment on quality and storage characteristics of freeze-dried strawberry[D]. Jinzhou: Bohai University, 2024. ]
[9] ROJAS M L, SILVEIRA I, AUGUSTO P E D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 119: 20−30.
[10] 孟繁博, 黄道梅, 郑秀艳, 等. 超声波预处理对热风干燥火龙果片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 205−209. [MENG Fanbo, HUANG Daomei, ZHENG Xiuyan, et al. Ultrasound pretreatment on quality of pitaya before hot air drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 205−209. ]
[11] WANG Mengze, GAO Yiwei, HU Binfang, et al. Freeze-thaw pretreatment improves the vacuum freeze-drying efficiency and storage stability of goji berry (*Lycium barbarum*. L.)[J]. LWT, 2023, 189: 115439.
[12] FENG Y B, PING TAN C, ZHOU C S, et al. Effect of freeze-thaw cycles pretreatment on the vacuum freeze-drying process and physicochemical properties of the dried garlic slices[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126883.
[13] 李琳琳. 脉冲喷动协同微波冷冻干燥山药的品质与能耗减损研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [LI Linlin. Study on energy saving and quality loss-reduction of pulse-spouting combined with microwave freeze-drying of Chinese yam[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019. ]
[14] YAMAKAGE K, YAMADA T, TAKAHASHI K, et al. Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102615.
[15] 项可心, 张博, 赵邯, 等. 水蜜桃片冻干-压差膨化干燥过程中水分与糖分迁移规律[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 248−258. [XIANG Kexin, ZHANG Bo, ZHAO Han, et al. Migration patterns of moisture and sugar in honey peach slices during vacuum freeze-drying combined with puffing drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 248−258. ]
[16] BAO Xin, MIN Rui, ZHOU Kai, et al. Effects of vacuum drying assisted with condensation on drying characteristics and quality of apple slices[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 340: 111286.
[17] 冯亚斌. 基于真空冷冻干燥效率及品质控制的大蒜预处理技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. [FENG Yabin. Research on pretreatment technologies to improve the drying efficiency and the quality of vacuum freeze-dried garlic slices[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. ]
[18] WU Bengang, GUO Xiuyu, GUO Yiting, et al. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure[J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129845.
[19] 唐小闲, 陈海荣, 任爱清, 等. 不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(24): 42−50. [TANG Xiaoxian, CHEN Hairong, REN Aiqing, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and nutrient quality of Sanhua plum slices[J]. Food Research and Development, 2022, 43(24): 42−50. ]
[20] 朱金星. 草莓组合干燥工艺及品质变化研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [ZHU Jinxing. Study on the combined drying process and quality of strawberry[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022. ]
[21] 郝启栋. 大蒜热风干燥特性及水分迁移规律研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021. [HAO Qidong. Study on air drying characteristics and water transfer of garlic (*Allium sativum* L.)[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021. ]
[22] YANG Shini, WANG Xue, HUANG Xuan, et al. Development and validation of an analytical method for the quantification of capsanthin in chili peppers and products by high-performance liquid chromatography[J]. European Food Research and Technology, 2024, 250(9): 2343−2352.
[23] CARDOSO R V, da SILVA D V T, de JESUS LOPES SANTOS-SODRÉ S, et al. Green ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from Cumari-Do-Pará peppers (*Capsicum chinense* Jacq.) employing vegetable oils as solvents[J]. Foods, 2024, 13(17): 2765.
[24] WANG Jun, CHEN Yuxian, WANG Hui, et al. Ethanol and blanching pretreatments change the moisture transfer and physicochemical properties of apple slices via microstructure and cell-wall polysaccharides nanostructure modification[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132274.
[25] OBAJEMIHI O I, ESUA O J, CHENG J H, et al. Effects of pretreatments using plasma functionalized water, osmodehydration and their combination on hot air drying efficiency and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) slices[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 134995.
[26] 姜佳惠. 草莓微波冻干过程及品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [JIANG Jiahui. Study on the microwave freeze-drying process and quality control of strawberry[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. ]
[27] 张小慧, 连梦瑶, 李欢, 等. 不同品种辣椒挥发性香味物质的对比[J]. 食品工业, 2023, 44(12): 119−125. [ZHANG Xiaohui, LIAN Mengyao, LI Huan, et al. Comparison of volatile aroma substances in different varieties of pepper[J]. The Food Industry, 2023, 44(12): 119−125. ]
[28] 陈菊, 孙小静, 黄裕兵, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱的糟辣椒挥发性物质非靶标代谢组学分析[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 181−189. [CHEN Ju, SUN Xiaojing, HUANG Yubing, et al. Non-target metabolomics analysis of volatile compounds in fermented hot pepper based on headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2024, 45(13): 181−189. ]
[29] WANG Fengzhao, BI Jinfeng, LYU Mingyue, et al. Insight into the effect of osmosis agents on macro- and micro-texture, water distribution, and thermal stability of instant controlled pressure drop drying peach chips[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138236.
[30] TAN L, EBERHARD S, PATTATHIL S, et al. An *Arabidopsis* cell wall proteoglycan consists of pectin and arabinoxylan covalently linked to an arabinogalactan protein[J]. The Plant Cell, 2013, 25(1): 270−287.
[31] 李淑娟, 吕健, 毕金峰, 等. 热烫和脉冲超声预处理对猕猴桃果块组织和糖液特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(4): 289−300. [LI Shujuan, LÜ Jian, BI Jinfeng, et al. Effects of blanching and pulsed ultrasonic pretreatment on kiwifruit tissue and properties of sugar solution[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(4): 289−300. ]
[32] 杜茜茜. 真空冷冻干燥重组苹果脆片质构及吸湿特性的影响因素研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2021. [DU Xixi. Influencing factors of texture and hygroscopicity characteristics of freeze-dried restructured apple chips[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2021. ]
[33] XU Xin, ZHANG Lei, FENG Yabin, et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum

freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105300.
[34] FENG Y B, YU X J, YAGOUB A E A, et al. Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 50: 363−372.
[35] 王梦泽. 冻融处理对枸杞冻干果色泽稳定性的影响及机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [WANG Mengze. Effect and action mechanism of freeze-thaw treatment on the color stability of lyophilized goji berry[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]
[36] XU B G, FENG M, CHITRAKAR B, et al. Multi-frequency power thermosonication treatments of clear strawberry juice: Impact on color, bioactive compounds, flavor volatiles, microbial and polyphenol oxidase inactivation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103295.
[37] ZHANG Zhenna, WANG Juan, ZHANG Xueying, et al. Effects of radio frequency assisted blanching on polyphenol oxidase, weight loss, texture, color and microstructure of potato[J]. Food Chemistry, 2018, 248: 173−182.
[38] YAO Yishun, WEI Xunjiao, PANG Huiyun, et al. Effects of radio-frequency energy on peroxidase inactivation and physiochemical properties of stem lettuce and the underlying cell-morphology mechanism[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126753.
[39] LI Xin, ZHOU Yan, DONG Hao, et al. Effects of ultrasonication and freeze-thaw pretreatments on the vacuum freeze-drying process and quality characteristics of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaoganxing)[J]. Food Chemistry, 2024, 22: 101357.
[40] ANDO Y, MAEDA Y, MIZUTANI K, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 40−46.
[41] TUMER E, TULEK Y. Effects of dehydrofreezing conditions on tomato lycopene and kinetics of lycopene change in dehydrofrozen tomatoes during storage[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(2): e14237.
[42] 宋艾杰, 牛亮峰, 张超, 等. 辣椒素及二氢辣椒素的制备方法及其结构确证[J]. 山东化工, 2019, 48(1): 22−24. [SONG Aijie, NIU Liangfeng, ZHANG Chao, et al. Preparation method and structure confirmation of capsaicin and dihydrocapsaicin[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(1): 22−24.]
[43] ZHANG Sinan, ZHAO Yadong, YAO Xueshuang, et al. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on flavour and physicochemical properties of freeze-dried carambola slices[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(7): 4245−4253.
[44] FEUMBA DIBANDA R, PANYOO AKDOWA E, RANI P A, et al. Effect of microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peelings[J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125308.
[45] CHEN F Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Comparative evaluation of the properties of deep-frozen blueberries dried by vacuum infrared freeze drying with the use of $CO_2$ laser perforation, ultrasound, and freezing-thawing as pretreatments[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1805−1816.
[46] NIAN Xin, WANG Jitao, WANG Mengze, et al. Influence of ultrasonic pretreatment on the quality attributes and pectin structure of chili peppers (*Capsicum* spp.)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107041.
[47] 吴凯. 不同处理方式对白辣椒品质及风味的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021. [WU Kai. Study on the quality and flavor of white pepper by different treatment methods[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.]
[48] WANG Chao, ZHANG Lihui, QIAO Yu, et al. Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slice[J]. LWT, 2022, 160: 113232.
[49] LU Rongrong, MA Yue, WANG Xu, et al. Study of texture properties of 'laba' garlic in different color states and their change mechanisms[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(9): 4710−4721.
[50] 刘波, 冯树涛, 李航, 等. 辣椒中香气成分分析技术及影响因素研究进展[J]. 蔬菜, 2025(4): 19−25. [LIU Bo, FENG Shutao, LI Hang, et al. Research progress on analysis technologies and influencing factors of aroma component in pepper[J]. Vegetables, 2025(4): 19−25.]
[51] TAITI C, COSTA C, MIGLIORI C A, et al. Correlation between volatile compounds and spiciness in domesticated and wild fresh chili peppers[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(8): 1366−1380.
[52] MANIKHARDA, TAKAHASHI M, ARAKAKI M, et al. Influence of fruit ripening on color, organic acid contents, capsaicinoids, aroma compounds, and antioxidant capacity of shimatogarashi (*Capsicum frutescens*)[J]. Journal of Oleo Science, 2018, 67(1): 113−123.