马婵, 杜紫薇, 牛犇, 等. 远红外联合热泵干燥葡萄过程中干燥特性及葡萄干品质的变化 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 126−134. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020206

MA Chan, DU Ziwei, NIU Ben, et al. Changes of Drying Characteristics and Raisin Quality in the Process of Drying Grape by Far-infrared Combined Heat Pumps[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 126−134. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020206

· 研究与探讨 ·

远红外联合热泵干燥葡萄过程中干燥特性及葡萄干品质的变化

马　婵[1,2], 杜紫薇[3,+], 牛　犇[2], 刘瑞玲[2], 陈慧芝[2], 黄　俊[1], 龚金炎[1], 韩延超[2,*], 郜海燕[2,*]

（1.浙江科技大学生物与化学工程学院, 浙江杭州 310023;
2.浙江省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 浙江省农业科学院食品科学研究所, 浙江杭州 310021;
3.金华职业技术大学, 浙江金华 321017）

摘　要: 为探究葡萄在远红外联合热泵干燥过程中的水分迁移及品质变化，采用低场核磁共振及成像技术对其干燥特性和质子密度成像进行分析，并研究在热泵 60、80 和 100 ℃ 温度下葡萄干的微观结构和营养品质。结果表明：热泵温度为 60、80 和 100 ℃ 时到达干燥终点的时间分别为 600、540 和 420 min，不同热泵温度下，葡萄干低场核磁 T_2 图谱整体向左移动且信号幅值逐渐降低。低场核磁结果表明，葡萄干外部的自由水最先被脱除，内部的水分向外迁移，温度越高迁移的速率越快。微观结构观察显示，随着热泵温度升高，葡萄干细胞结构破坏加剧。热泵温度为 80 ℃ 时，葡萄干的 L^* 值相较 60 ℃ 和 100 ℃ 分别提高 11.23% 和 4.68%，可溶性固形物（Total Soluble Solids，TSS）含量分别提高 31.42% 和 33.45%；可滴定酸（Titratable Acidity，TA）含量分别降低 13.09% 和 6.59%，表明 80 ℃ 处理更有利于保持葡萄干的色泽、可溶性固形物含量，并减少有机酸降解。此外 80 ℃ 干燥后葡萄干的维生素 C（V_C）、总酚、总黄酮和花色苷含量分别比干燥前下降 78.28%、66.01%、40.59% 和 77.14%，与 60 ℃ 和 100 ℃ 相比，80 ℃ 干燥时的营养成分损失最小。综上所述，远红外联合热泵干燥的温度为 80 ℃ 是加工葡萄制品的最佳温度，是提升葡萄制品质量的关键工艺参数。

关键词: 葡萄干, 远红外联合热泵干燥（HPD-FIRD）, 水分迁移, 微观结构, 营养品质
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0126−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020206　　本文网刊:

Changes of Drying Characteristics and Raisin Quality in the Process of Drying Grape by Far-infrared Combined Heat Pumps

MA Chan[1,2], DU Ziwei[3,+], NIU Ben[2], LIU Ruiling[2], CHEN Huizhi[2], HUANG Jun[1], GONG Jinyan[1], HAN Yanchao[2,*], GAO Haiyan[2,*]

（1.College of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2.Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Food Logistic and Processing, Key Laboratory of Post-harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;
3.Jinhua University of Vocational Technology, Jinhua 321017, China）

收稿日期: 2025−02−26　　+并列第一作者
基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目（2023C02006）。
作者简介: 马婵（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 供应链保鲜, E-mail: machan1214@163.com。
杜紫薇（1982−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: 1260822995@qq.com。
*** 通信作者:** 韩延超（1986−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: hanhanzhixing@126.com。
郜海燕（1958−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: spsghy@163.com。

Abstract: This study investigated moisture migration and quality changes in grape during the far-infrared combined heat pump drying process, utilizing low-field nuclear magnetic resonance and imaging techniques to analyze drying characteristics and proton density imaging. The research further examined the microstructure and nutritional quality of raisins subjected to heat pump temperatures of 60, 80, and 100 ℃. The results revealed that the drying endpoint was reached in 600, 540, and 420 min at temperatures of 60, 80, and 100 ℃, respectively. Under varying heat pump temperatures, the low-field NMR T_2 spectra of raisins exhibited a consistent leftward shift, accompanied by a gradual decrease in signal amplitude. The NMR results suggested that the free water on the surface of the raisins was removed first, while internal moisture migrated outward, with an increased migration rate at higher temperatures. Microstructural observations demonstrated that increased heat pump temperatures correlated with increased structural damage to grape cells. At a heat pump temperature of 80 ℃, the L^* value of raisins increased by 11.23% and 4.68% compared to 60 ℃ and 100 ℃, respectively. The total soluble solids (TSS) content rose by 31.42% and 33.45%, and the titratable acid (TA) content decreased by 13.09% and 6.59%. These findings suggested that treatment at 80 ℃ was more effective in preserving the color, total soluble solids content, and in mitigating the degradation of organic acids in raisins. Furthermore, at this temperature, the contents of Vitamin C (V_C), total phenols, total flavonoids, and anthocyanins decreased by 78.28%, 66.01%, 40.59%, and 77.14%, respectively, compared to their levels before drying. The nutritional loss of raisins was minimal at 80 ℃ when compared to 60 ℃ and 100 ℃. In conclusion, 80 ℃ is identified as the optimal temperature for far-infrared combined heat pump drying, serving as a key process parameter for enhancing the quality of grape products.

Key words: raisins; far infrared combined with heat pump drying (FIR-HPD); water migration; microstructure; nutritional quality

葡萄是一种非呼吸跃变型果实，因其具有较高的水分和糖含量，所以在自然状态下极易发生腐败现象。因此除鲜食外，葡萄被加工成各种高附加值产品，如葡萄酒、葡萄干和葡萄果酱等[1]。葡萄干凭借其能够完整保留葡萄营养品质以及便于储存和运输的显著优势，获得了广泛的关注。葡萄干中含有许多有益的成分，如矿物质、维生素和膳食纤维等，这些活性成分具有抗炎、抗氧化和防癌变等功能[2−4]。

传统上，葡萄的干燥方式多采用自然露天晒干、阴干、日光干燥等。这些方法虽然成本低廉，但耗时较长且容易受到天气等因素影响[5]。目前，热泵干燥（Heat Pump Drying, HPD）在葡萄干燥方面具有良好的应用前景。凭借其低成本、高效节能的特性而受到青睐，但干燥后期效率下降，导致物料结合水难以有效脱除[6]。远红外干燥（Far-InfraRed, FIR）因穿透能力强，热效率高以及均匀的干燥效果而备受关注，但是在干燥前期物料散发的水蒸气难以有效去除，制约了干燥效率[7]。远红外联合热泵干燥能够克服单一干燥的局限性，通过优势互补，实现更高效的干燥效果。目前，该技术已在胡萝卜、山药片和金银花等食品中应用，在葡萄加工方面还未见研究[8−10]。

目前，对于热泵远红外联合干燥的研究可分为热泵红外干燥效率的研究和热泵红外干燥对果蔬品质的影响研究。Song 等[11] 研究了山药在 FIR-HPD 不同功率下的干燥效果，并和单一热泵干燥进行比较。结果表明，联合干燥后的山药片色泽优于单一热泵产品；而且，单一热泵与 1500 W 远红外辐射功率结合干燥的山药切片，复水能力更强，硬度更低。彭健等[12] 研究表明，分段式远红外-热泵干燥可显著降低龙眼的硬度，同时提升其弹性和咀嚼性。此外，60 ℃ 条件下的远红外-热泵干燥能有效抑制龙眼褐变，而 100 ℃ 远红外干燥则会导致其可溶性糖含量下降。由此可见，热泵远红外联合干燥技术在保障果蔬品质方面展现出良好的应用前景。

低场核磁共振（Low-Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR）因非侵入性、高分辨、高灵敏和高对比等优势，在食品品质检测领域备受青睐。高晓倩等[13] 采用 LF-NMR 技术，在双孢菇干燥过程中检测到三个峰，分别为结合水、不易流动水和自由水，并且在干燥过程中随温度升高，内部水分迁移速率越快。李萍等[14] 探究高油酸花生 YH37 在 25 ℃ 下浸种 3 h 相较于 31 ℃ 浸种 3、6 h 后，非结合水信号幅度增加率下降，结合水信号幅度增加率显著提高。陈恺等[15] 通过 LF-NMR 实验研究表明，杏片干燥前期主要以表面汽化为主，杏片中自由水最先被脱除，干燥后期由内部扩散控制，部分自由水转化为不易流动水和结合水。以上研究证实，低场核磁共振技术能够有效应用于食品干燥过程监测、复水特性评估以及水分迁移规律等方面，为食品加工和贮藏提供重要的理论依据和技术支持。

本研究旨在探究热泵-远红外联合干燥技术对葡萄品质的影响，通过设置不同热泵温度，结合 LF-NMR 分析葡萄干燥过程中的水分状态和微观结构变化，并系统评估不同干燥条件下葡萄干的色泽、可溶性固形物（Total Soluble Solids, TSS）、可滴定酸（Titratable Acidity, TA）、维生素 C（V_C）、总酚、总黄酮和花色苷等营养成分的变化规律，为推进葡萄干燥加工产业发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

“克伦生”葡萄　浙江省绍兴市上虞区浩逸葡萄基地；PBS 缓冲液、无水乙醇、三氯化铁、甲醇、福林

酚　分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；三氯乙酸、碳酸钠、硝酸铝　分析纯，上海凌峰化学试剂有限公司。

ME103E 电子天平　瑞士梅特勒-托利公司；JG-KHR-4.6ⅡC 远红外联合空气能热泵机　浙江金光设备公司；877 Titrino plus 自动滴定仪　瑞士万通公司；PAL-1 数显式手持糖度仪　日本 Atago 公司；NMI20-060-I 变温低场核磁共振成像分析仪　苏州纽迈仪器公司；TM3000 扫描电镜　上海日立仪器公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　挑选大小一致、颜色均一、无损伤、无病害的葡萄果实，并用冷藏车快速运回实验室。除去田间热后将新鲜葡萄平均分为三组，每组设置三个重复，每个重复样本质量为 5 kg。将样品单层放在干燥室中，通过设定不同的热泵温度对其进行干燥处理。干燥过程中，采用间歇称重法（30 min）监测样品质量变化，当相邻两次称重质量差小于 0.1 g 时，即结束。通过预实验优化，确定最佳干燥工艺条件为：远红外功率 400 W，全程辅助热泵干燥，热泵温度为 60、80、100 ℃。

1.2.2　干基含水率测定　干基含水率用以下公式计算[16]。

$$干基含水率(\%)=\frac{(m_t-m_0)}{m_0}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中 m_t 为物质 t 时刻质量，g；m_0 为干物质重量，g。

1.2.3　干燥速率测定　干燥速率用以下公式计算[16]。

$$干燥速率(\%)=\frac{W_1-W_2}{t_2-t_1}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中 W_1 为物质 t_1 时刻干基含水率，%；W_2 为物质 t_2 时刻干基含水率，%。

1.2.4　低场核磁共振测定　依据葡萄干样品尺寸选择 25 mm 的探头，自由感应衰减（Free Induction Decay，FID）脉冲序列进行系统校准[17]。将不同处理的葡萄干放在管中，利用硬脉冲回波序列（Carr–Purcell–Meiboom–Gill，CPMG）测定 T_2。变量为：频率偏置 157075.11 Hz；脉宽 14 us；前方档位 1；等待时间 4500 ms；180 度脉宽 27.04 us；回波时间 0.3 ms；回波个数 18000；波峰偏移 0.01 ms；采样频率 200 kHz；射频延时 0.08 ms；数字增益 1；模拟增益 20 dB；数据半径 1；累加次数 8。

1.2.5　磁共振成像（MRI）　使用 IR 序列呈像[18]，将不同处理的葡萄干放在射频线圈的中心。变量为：回波时间 20 ms；累加次数 24；相位编码步数 192；频率编码视野 256 mm×256 mm。

1.2.6　微观结构观察　参照 Pourbagher 等[19] 方法稍作修改。将不同处理的样品切成 1 mm×1 mm×1 mm 的小块，用戊二醛溶液固定和 0.1 mol/L、pH7.2 PBS 溶液冲洗，最后在 50%、80% 和 100% 乙醇中脱水，将脱水后的样品干燥并喷金处理，使用扫描电镜观察微观结构。

1.2.7　色泽测定　参照 Zhang 等[20] 方法稍作修改。使用手持色差仪测定葡萄干赤道的色泽，记录 L^*、a^*、b^*和ΔE 值（L^*值代表样品与标准品的明度差异，a^*值代表红色和绿色的差异，b^*值代表黄色和蓝色的差异，ΔE 代表总色差）。

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2} \qquad 式（3）$$

式中 $\Delta L^*=L-L_0$，$\Delta a^*=a-a_0$，$\Delta b^*=b-b_0$；其中，L、a、b 值为实际待测值；L_0、a_0、b_0 为标准调色板的标准值。

1.2.8　TSS 测定　采用数显式手持糖度仪测定 TSS 含量。用纱布将水果包裹起来确保去除其中的固体颗粒和残渣，挤压出汁滴到糖度仪呈玻璃反光的一面，直至无汁释放为止，读取糖度仪显示的数值。结果以总可溶性固形物的百分比（%）表示。

1.2.9　TA 测定　采用自动滴定仪测定 TA 含量。用已知浓度的氢氧化钠溶液滴定提取液，根据氢氧化钠的消耗量计算可滴定酸的含量。结果以酒石酸的百分比（%）表示。

1.2.10　抗坏血酸含量测定　利用 Yang 等[21] 方法。1 g 样品中加入 5 mL、5% TCA 溶液，在 12000×g 下离心 15 min。在 0.1 mL 上清液中加入 1 mL 乙醇、1.9 mL TCA、0.5 mL 0.5% 磷酸-乙醇、1 mL 0.5% 邻菲罗琳-乙醇和 5 mL 0.03% $FeCl_3$-乙醇，将混合物在 30 ℃ 下保存 1 h，测定反应体系在 534 nm 波长处的吸光度值，标准曲线方程为 y=0.008x+0.0917，R^2=0.9921。

$$抗坏血酸含量(mg/100\ g)=\frac{V\times m'}{V_s\times m\times 1000}\times 100 \qquad 式（4）$$

式中 V 为样品提取液总体积，mL；m'为由标准曲线求得的抗坏血酸的质量，μg；V_S 为所用样品提取液体积，mL；m 为样品质量，g。

1.2.11　总酚含量测定　参照 Akca 等[22] 方法稍作修改。将 1 mL 上清液转移到装有 5 mL 蒸馏水和 1 mL 25% Na_2CO_3 的烧瓶中，再加入 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂并用蒸馏水定容至 10.0 mL。以没食子酸为标准物，测定 760 nm 处吸光度，标准曲线方程为 y=0.006x+0.2283，R^2=0.9919。

$$总酚含量(mg/100\ g)=\frac{C\times V}{W}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中 C 为由标准曲线求得的浓度，mg/mL；V 为提取液体积，mL；W 为样品质量，g。

1.2.12　总黄酮含量测定　参照 Ge 等[23] 方法稍作修改。取 0.2 g 样品置于 1 mL 60% 乙醇中，4 ℃ 离心。取 200 μL 上清液加 0.1 mL 5% 碳酸钠和320 μL 10% 硝酸铝。测定 510 nm 处吸光度，标准曲线方程为 y=0.0051x−0.0028，R^2=0.9992。

$$总黄酮含量(mg/100\ g)=\frac{C\times V}{W}\times D\times 100 \quad 式（6）$$

式中 C 为由标准曲线求得的浓度，mg/mL；V 为提取液体积，mL；W 为样品质量，g；D 为稀释倍数。

1.2.13　花色苷含量测定　采用 pH 示差法[24]。称取 0.1 g 样品加入 0.2 mL pH3.0 的 60% 乙醇溶液，40 ℃ 水浴 2 h，离心取 0.1 mL 上清液，分别用 0.2 mol/L KCl 缓冲液（pH1.0）和 1 mol/L NaAc 缓冲液（pH4.5）定容至 10 mL 容量瓶中，分别在510 nm 和 700 nm 下测定吸光度，结果以每克葡萄所含 Cy-3-glu 毫克数（mg 100/g）表示。

$$花色苷含量(mg/mL)=\frac{A\times MW\times DF}{\varepsilon}\times 1 \quad 式（7）$$

式中 $A=(A_{510}-A_{700})pH1.0-(A_{510}-A_{700})pH4.5$；MW 为矢车菊素-3-葡萄糖苷相对分子量，取 449.2；DF 为稀释倍数；ε 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数，取 26900；1 为比色皿光程，cm。

1.3　数据处理

所有实验均进行三次平行，所有数据均以平均值±标准差表示。数据使用 SPSS（Statistics 25）进行分析，采用 *t* 检验比较不同处理组间的差异，显著性分析采用 Duncan 多重检验（$P<0.05$），并使用 GraphPad Prism8 进行作图。

2　结果与分析

2.1　联合干燥不同热泵温度对葡萄干的干燥特性影响

干基含水率曲线如图 1A 所示。葡萄干的干基含水率与干燥时间呈负相关，且热泵温度是影响干燥时间的关键因素。热泵温度为 60 ℃ 时，干燥时间最长为 600 min；热泵温度为 80 ℃ 和 100 ℃ 时，时间为 540 min 和 420 min。说明在干燥过程中，随着温度的升高，水分子动能逐渐增强，导致运动速率加快，这一过程促进了水分的蒸发，进而缩短达到干燥状态所需的时间。因此，在确保样品品质的基础上，通过合理提高干燥温度可显著优化干燥效率，缩短干燥周期，这一结论和康宏彬等[25] 对陈皮干燥的研究结果一致。干燥速率曲线如图 1B 所示，不同热泵温度下干燥速率有所差异，但都包含升速、恒速和降速 3 个阶段。但是在杏鲍菇和花生仁干燥过程中只存在加速和降速两个阶段，可能是因为它们的生理结构特点和干燥过程中的水分迁移特性使得干燥过程难以形成恒速阶段。在加速阶段，物料表面水分蒸发较快；而在降速阶段，物料内部水分迁移成为主要限制因素，导致干燥速率逐渐降低[26−27]。在葡萄干联合干燥初期，系统产生的循环气流使环境热量通过对流换热的方式传递到样品表面，同时远红外辐射以独特的穿透性作用于葡萄内部[28]。这种协同作用显著提升了物料整体温度，从而实现了干燥速率的提升。在干燥后期，自由水快速蒸发，样品中主要残留以氢键与蛋白质极性基团紧密结合的结合水[29]。由于形成基团的解离能显著高于自由水的解离能，所以导致水分迁移阻力增大，最终表现为干燥曲线进入降速阶段，到达干燥终点时速率约以 3%/min 保持恒变。

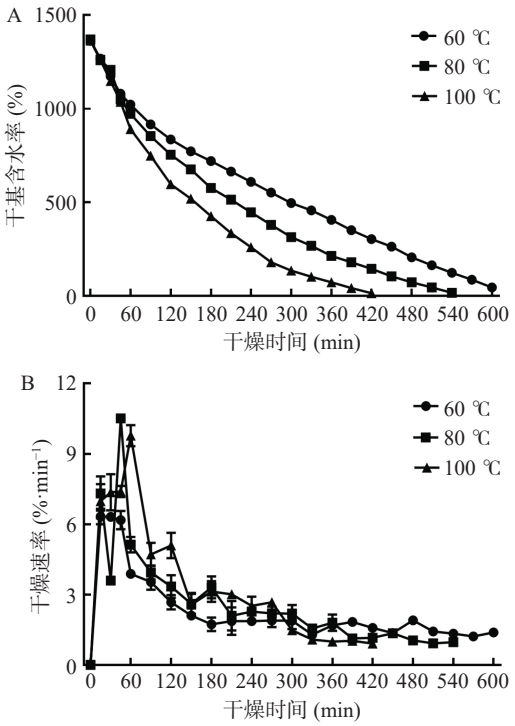


图 1　不同热泵温度下葡萄干的干燥含水率和干燥速率曲线

Fig.1　Dry-based water content and drying rate curves raisins under different heat pump temperatures

2.2　联合干燥不同热泵温度反演谱（T_2）随干燥时间变化的影响

水分在维持葡萄采后新鲜度和品质方面起着至关重要的作用。横向弛豫时间（T_2）是核磁共振中表征核磁化强度横向分量恢复过程的时间常数。它表示样品内的原子核保持自旋相位的时间，T_2 越长，样品的信息就能被更好地保留。即 T_2 越大，与大分子结合力就越小，质子自由度就越大，水的流动性就越大，干燥时就越容易被去除；反之，干燥时就越难被去除[30]。联合干燥不同热泵温度下葡萄干的 T_2 反演谱如图 2 所示，按照波峰所在区域划定葡萄干中水分的三种状态，从左到右依次为 T_{21}（0.1~10 ms）、T_{22}（10~100 ms）和 T_{23}（>100 ms），它们分别为结合水、不易流动水和自由水。在大蒜等食物的干燥过程中都存在相同的三个波峰[31]。随着干燥时间的延长，不同热泵温度下的 T_2 图谱整体都向左移动且信号幅值都逐渐降低，即在干燥过程中，葡萄干中的自由水逐渐被脱除，导致水分含量持续下降。研究表明，蓝莓在经过机械损伤后 T_2 弛豫呈现差异[17]。发现在相同的损伤等级下，随着贮藏时间的延长，液泡水主峰整体呈现小幅下降和右移的趋势，这一变化可能与蓝莓细胞受损后无法有效保持水分，最终导致水分向果实的其他部分或外部环境转移。不同热泵温度条件下对葡萄干的反演谱图进行对比分析，发现在 100 ℃ 时，T_{23} 信号幅值在干燥初期快速下降，且

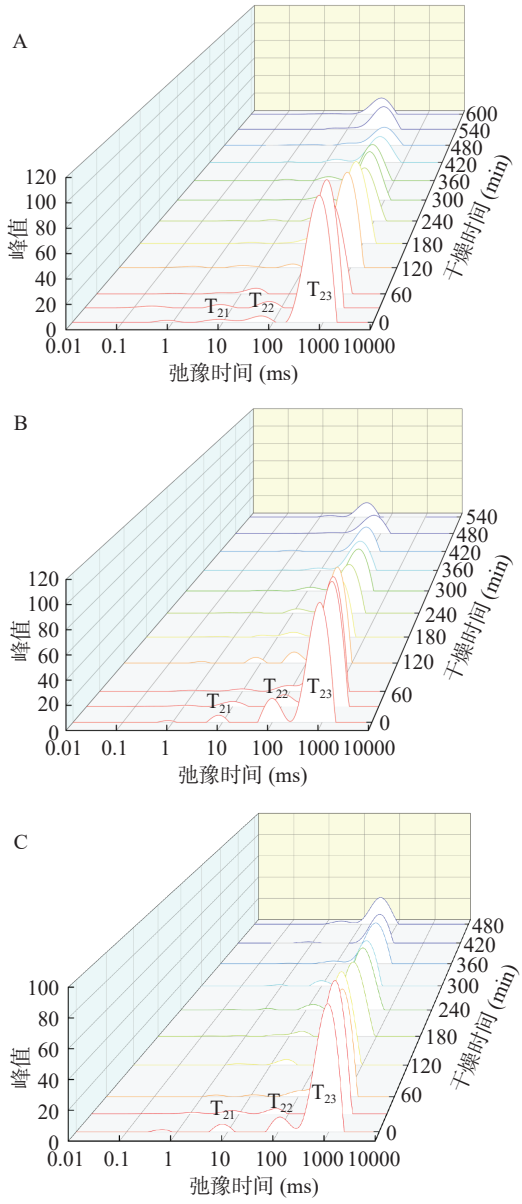


图 2　不同热泵温度下葡萄干的 T_2 反演谱

Fig.2　T_2 inversion spectra of raisins under different heat pump temperatures

注: A. 热泵温度 60 ℃; B. 热泵温度 80 ℃; C. 热泵温度 100 ℃。

下降速率高于 80 ℃ 和 60 ℃。表明内部流动性较强的自由水最先被脱除。这一现象与杏鲍菇热风-微波干燥后的 T_2 反演谱图变化一致[26]。

2.3　联合干燥不同热泵温度对水分状态变化的影响

联合干燥不同热泵温度下对葡萄干水分状态变化的影响如图 3 所示。峰面积反映水分含量，干燥初期自由水的峰面积高达 2000，分别是不易流动水和结合水峰面积的 17 倍和 40 倍。这说明在干燥初期葡萄干中自由水的占比最大。随着干燥过程，自由水峰面积呈现先快后慢的下降趋势。同一时刻下 60 ℃ 自由水的峰面积高于 80 ℃ 和 100 ℃。可能是因为自由水的自由度和流动性高，在干燥过程中极易去除，且温度越高，脱除速率越快。不易流动水的峰面积整体呈现下降趋势，部分波动。80 ℃ 下不易流动水的峰面积高于 60 ℃ 和 100 ℃。可能是因为

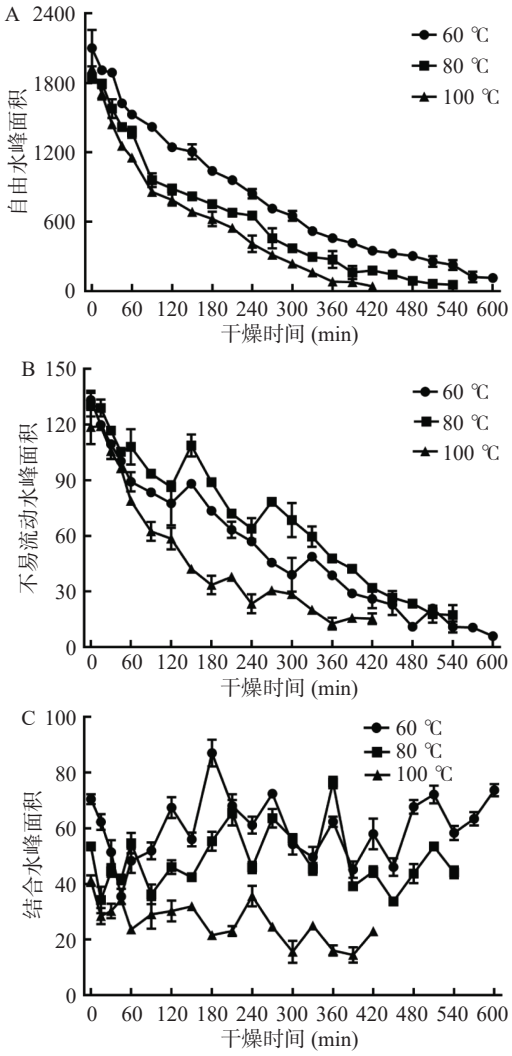


图 3　不同热泵温度下葡萄干的水分状态变化

Fig.3　Changes in water state of raisins under different heat pump temperatures

三种水分状态处于一种动态平衡，随着自由水的去除，一部分不易流动水向外移动转化为自由水，并随之蒸发[32]；其余的不易流动水与大分子相互作用为结合水。结合水的峰面积在整个干燥过程中呈现一种非线性的波动趋势，与自由水和不易流动水峰面积的变化存在显著差异。由此可知，提高干燥温度对结合水去除影响不大，可能是因其与蛋白质等大分子形成稳定氢键结合，难以去除[33]。这一现象与刘宗博[34]在双孢菇远红外干燥研究中的发现相一致。

2.4　联合干燥不同热泵温度葡萄干的核磁成像

低场核磁成像技术可以捕获样品内氢质子密度分布并生成图像。图像的灰度值反映氢质子的密度分布情况，通过将灰度图转变为彩色图，可以直观反映样品各水分含量的变化及分布状态。联合干燥不同热泵温度下葡萄干的核磁成像如图 4 所示。随着干燥时间的延长，葡萄干成像的形状由椭圆形逐渐变为不规则的矩形，直至模糊消失；葡萄干内部的深红色逐渐变浅，面积也随之缩小，边缘的黄色在变浅后消失，面积逐渐扩大，最终消失，直至到达干燥末期，

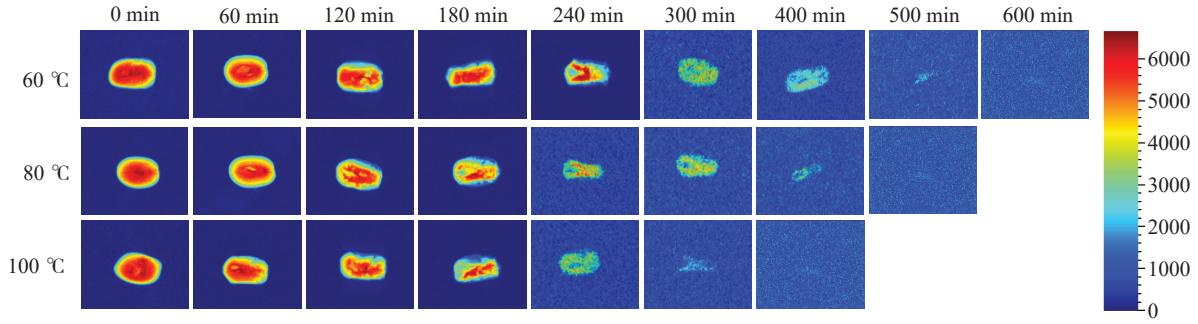


图 4　联合干燥不同热泵温度下葡萄干的核磁成像

Fig.4　NMR imaging of raisins under different heat pump temperatures

注：颜色不同代表质子密度不同（含水量不同），红色表示含水量高，蓝色表示含水量低。

水分含量过低无法检测信号从而不能呈像，说明葡萄干整体水分升华较多，中心位置是水分含量较高的位置。在胡萝卜干燥的过程中也有类似的发现：随着干燥时间的延长，伪彩图亮度逐渐降低、尺寸持续减小，表明在干燥过程中水的弛豫信号逐渐消失[35]。最外侧的自由水最先被脱除，内部的不易流动水向外部移动，说明水分干燥的过程中不仅涉及水分存在形式的变化，还有水分迁移的过程。100 ℃ 条件下，核磁成像的图像变化最显著，干燥时间为 300 min 时，图像已经完全模糊，葡萄干的水分含量已被脱除。以上研究结果说明，随着热泵温度升高，可以显著加快水分子的迁移速度，加剧水分状态变化，从而有效促进水分快速蒸发。

2.5　联合干燥不同热泵温度葡萄干的微观结构

用扫描电镜分别在低倍和高倍下观察葡萄干的表面微观结构，如图 5 所示。当热泵温度为 60 ℃ 和 80 ℃ 时，细胞结构经历了轻微的收缩，并伴有细微的褶皱现象；当热泵温度为 100 ℃ 时，细胞结构严重收缩，组织表面呈现出深色的孔洞，形成诸如“小山丘”等形状。放大倍数后，干燥后的葡萄干细胞整体呈现出不规则的形状，细胞结构变模糊。特别是在热泵温度为 100 ℃ 的条件下，细胞表面的形状遭到严重的破坏，细胞结构发生剧烈变形，呈现出巨大的孔隙结构。高晓倩等[13] 在远红外联合热泵干燥中观察双孢菇的微观结构随着热泵温度的升高，双孢菇的微观结构经历了严重的损伤变化，具体为细胞严重受损，且组织出现大面积的断层现象。因此，通过微观结构分析可得，随着热泵温度的不断上升，葡萄干细胞结构的破坏程度显著加剧，导致水分受到的束缚力降低，进而加快水分子的迁移速度。

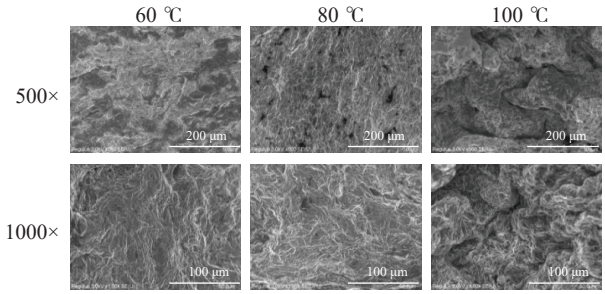


图 5　不同热泵温度下葡萄干的微观结构

Fig.5　Microstructure of raisins under different heat pump temperatures

2.6　联合干燥不同热泵温度对葡萄干感官品质的影响

联合干燥不同热泵温度下葡萄干的表观变化如图 6 所示。随着干燥时间的延长，葡萄表面发生失水皱缩，颜色由鲜红透亮变为棕色或深褐色，果粒由饱满圆润变为不规则的扁形。随着热泵温度的升高，葡萄失水效果明显加剧。由表 1 可知，干燥后葡萄的色泽、TSS 和 TA 都发生了不同程度的变化。与干燥前相比，温度显著影响葡萄的 L^*值、a^*值、b^*值、TSS 和 TA 含量（$P<0.05$），但对ΔE 影响不显著。结果显示，100 ℃ 和 60 ℃ 干燥处理的样品 L^*较 80 ℃ 分别降低 4.68% 和 11.23%，表明过高或过低的干燥温度均会显著降低葡萄亮度，而 80 ℃ 处理能保持较高亮度，这可能是因为该温度下适宜的干燥条件有效

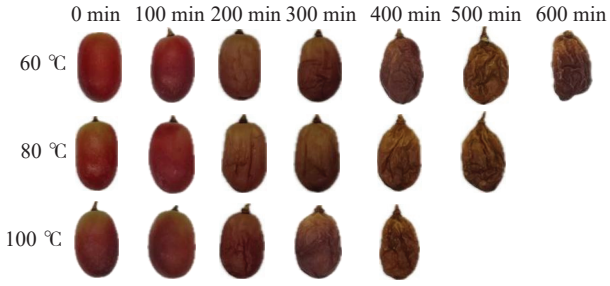


图 6　不同热泵温度下葡萄干的表观变化

Fig.6　Changes of raisins under different heat pump temperatures

表 1　联合干燥不同热泵温度下葡萄干的品质

Table 1　Quality of raisins under different heat pump temperatures for combined drying

指标	鲜样	60 ℃	80 ℃	100 ℃
L^*	39.33±0.74^a	27.51±0.41^d	30.99±0.84^b	29.54±0.16^c
a^*	3.48±0.68^b	8.39±0.71^a	8.15±1.92^a	8.88±1.77^a
b^*	0.72±0.58^b	4.35±3.74^a	3.34±1.04^a	3.73±1.80^a
ΔE	43.54±0.51^a	40.25±3.55^a	42.49±1.39^a	42.16±1.04^a
TSS(%)	21.82±1.49^c	44.75±3.20^b	58.81±3.69^a	44.07±2.14^b
TA(%)	1.56±0.29^c	3.59±0.19^a	3.12±0.09^b	3.34±0.06^{ab}

注：L^*值代表样品与标准品的明度差异；a^*值代表红色和绿色的差异；b^*值代表黄色和蓝色的差异；ΔE代表总色差；同一行不同字母表示同一指标在不同条件下的差异显著（$P<0.05$）。

抑制了酶促褐变。同时，干燥后样品的 a^*值显著增加，60、80 和 100 ℃ 处理的 a^*值较鲜样分别上升 58.52%、57.30% 和 60.81%。综合色泽指标表明 80 ℃ 干燥能最大限度保留样品色泽。这与 Song 等[11] 在山药片中发现联合干燥的色泽优于单一 HPD 产品的结果相一致。80 ℃ 干燥样品的 TSS 含量较 100 ℃ 和60 ℃ 分别高 33.45% 和 31.42%；而 TA 含量则分别降低 6.59% 和 13.09%。说明 80 ℃远红外联合热泵干燥能更好地维持葡萄的可溶性固形物含量并减少有机酸降解，这主要归因于该温度下适中的干燥速率既有利于保留营养成分，又能减少热敏性物质的损失[12]。

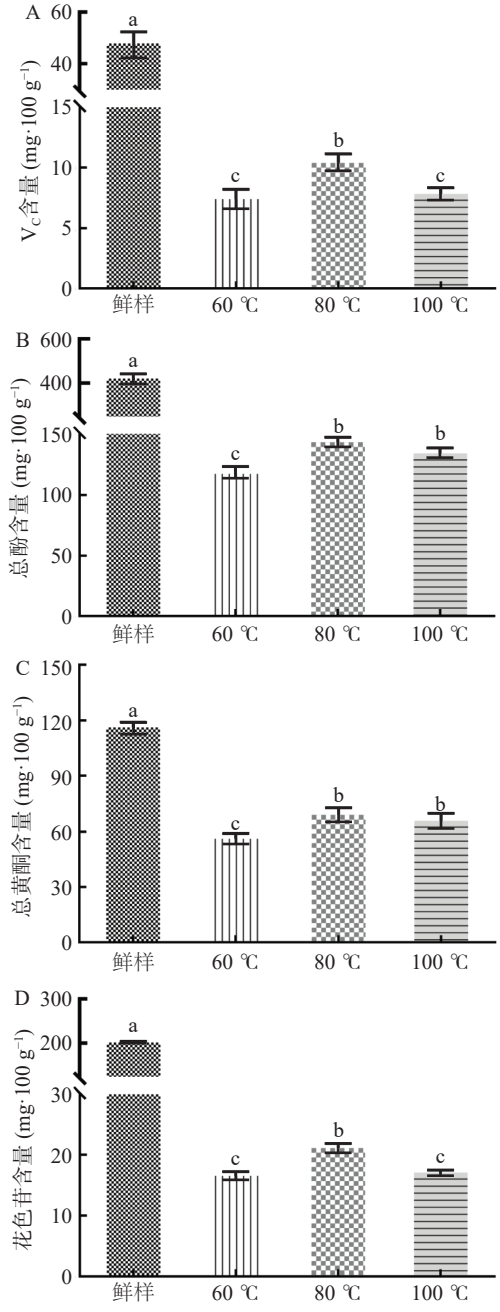


图 7 联合干燥不同热泵温度下葡萄干的营养品质

Fig.7 Nutritional quality of raisins under different heat pump temperatures

注：不同字母表示同一指标在不同条件下的差异显著(P<0.05)。

2.7 联合干燥不同热泵温度对葡萄干营养品质的影响

联合干燥不同热泵温度下葡萄干的营养品质变化如图 7 所示。与鲜样相比，葡萄干的 V_C、总酚、总黄酮和花色苷含量变化显著(P<0.05)。80 ℃ 时，V_C 含量较 60 ℃ 和 100 ℃，分别高 40.54% 和 32.65%(P<0.05)。60 ℃ 时，总酚和总黄酮含量较 100 ℃ 和 80 ℃，分别低 18.21% 和 12.67%、18.61% 和 14.76%(P<0.05)。可能是因为高温会抑制酶的活性，加剧糖苷键和酯键断裂，使酚类被释放，总酚含量升高[36−37]。80 ℃ 时，花色苷含量较 60 ℃ 和 100 ℃ 高 27.72% 和 23.61%(P<0.05)。可能是因为该温度下花色苷热稳定性相对较高、降解速率未显著增加，同时抑制了不利于花色苷保留的酶促反应和氧化反应，且适中的干燥速率既保证了效率又减少了花色苷损失[38]。采用远红外联合热泵干燥技术也可有效提高金银花中花色苷的含量[10]。综上所述，热泵温度为 80 ℃ 时，葡萄干的营养品质损耗最小。

3 结论

本研究通过利用 LF-NMR 技术、MRI 图像分析、微观结构观察及营养成分分析发现联合干燥不同热泵温度显著影响葡萄干水分状态和营养品质。LF-NMR 揭示了葡萄干存在三种水分状态：结合水、不易流动水和自由水。MRI 图像显示干燥过程中图像清晰度逐渐降低且变暗，外部的自由水最先被脱除，内部的水分向外迁移。热泵温度为 100 ℃ 时，干燥时间最短，干燥速率最快。热泵温度为 80 ℃ 时，葡萄干色泽、TSS、TA、V_C、总酚、总黄酮和花色苷等营养成分保持最佳。因此，低场核磁共振技术能够有效监测葡萄干制过程中的关键指标，对食品质量控制和检测具有重要的意义。此外，研究还论证了远红外联合热泵干燥在葡萄干加工领域的优越性，为实际生产中的广泛应用提供数据支持。

© 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] PAWAR D A, GIRI S K, SHARMA A K. Novel alternative pretreatment approaches for production of quality raisins from grapes: Opportunities and future prospects[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(4): e14305.

[2] QIN Liuwei, WANG Hong, ZHANG Wen, et al. Effects of different drying methods on phenolic substances and antioxidant activities of seedless raisins[J]. LWT, 2020, 131: 109807.

[3] JESZKA-SKOWRON M, ZGOŁA-GRZEŚKOWIAK A, STANISZ E, et al. Potential health benefits and quality of dried fruits: Goji fruits, cranberries and raisins[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 228−236.

[4] LIU Juan, WANG Yihai, LIU Ruihai, et al. Novel triterpenoids isolated from raisins exert potent antiproliferative activities by targeting mitochondrial and Ras/Raf/ERK signaling in human breast cancer cells[J]. Food & Function, 2016, 7(7): 3244−3251.

［5］ WANG J, MUJUMDAR A S, MU W, et al. Grape drying: Current status and future trends[M]. Grape and Wine Biotechnology. 2016, 7: 145−165.
［6］ ADILETTA G, RUSSO P, SENADEERA W, et al. Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 172: 9−18.
［7］ HUANG Dan, YANG Pei, TANG Xiaohong, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 765−777.
［8］ 顾震, 徐刚, 徐建国, 等. 胡萝卜热泵与远红外辐射加热联合干燥工艺研究[J]. 食品科技, 2009, 34(4): 75−78,84. ［GU Zhen, XU Gang, XU Jianguo, et al. Study on the heat pump and the far-infrared heating union drying of the carrot[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(4): 75−78,84. ］
［9］ 宋小勇. 远红外辅助热泵干燥对铁棍山药片品质影响[J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1337−1343. ［SONG Xiaoyong. Study on iron yam chips by far-infrared-assisted heat pump drying[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1337−1343. ］
［10］ 罗磊, 康新艳, 朱文学, 等. 热泵远红外联合干燥金银花的工艺优化及品质控制[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 6−12. ［LUO Lei, KANG Xinyan, ZHU Wenxue, et al. Optimization of far-infrared assisted heat pump drying parameters for quality control of dried honeysuckle[J]. Food Science, 2016, 37(18): 6−12. ］
［11］ SONG Xiaoyong, CHENG Luming. Study of iron yam-chip (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. tiegun) dehydration using far-infrared radiation assisted heat pump drying[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2015, 3(1): 20−25.
［12］ 彭健, 王蔚婕, 唐道邦, 等. 分段式远红外-热泵干燥对龙眼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 118−123. ［PENG Jian, WANG Weijie, TANG Daobang, et al. Effect of multi-stage far-infrared radiation-assisted heat pump drying on the quality characteristics of Longan[J]. Food Science, 2020, 41(19): 118−123. ］
［13］ 高晓倩, 刘瑞玲, 吴来春, 等. 基于 LF-NMR 研究双孢菇远红外辅助热泵干燥过程中水分迁移规律及品质变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 403−413. ［GAO Xiaoqian, LIU Ruiling, WU Laichun, et al. Studies on water migration rule and quality change of *Agaricus bisporus* during far-infrared assisted heat pump drying based on LF-NMR technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 403−413. ］
［14］ 李萍, 谢永康, 李星仪, 等. 不同类型花生浸种过程物理特性变化及内部水分迁移规律[J]. 河南农业科学, 2024, 53(8): 154−164. ［LI Ping, XIE Yongkang, LI Xingyi, et al. Physical characteristics changes and internal water migration of different types of peanut during seed soaking process[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(8): 154−164. ］
［15］ 陈恺, 承春平, 王雪妃, 等. 预处理对赛买提杏片热风干燥特性和水分迁移的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 311−324. ［CHEN Kai, CHENG Chunping, WANG Xuefei, et al. Effects of pretreatment on hot air drying characteristics and water migration of saimaiti apricot slices[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 311−324. ］
［16］ 张雨, 韩延超, 刘瑞玲, 等. FIRD-HPD 方式对蓝莓干燥特性及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 237−247. ［ZHANG Yu, HAN Yanchao, LIU Ruiling, et al. Effect of FIRD-HPD method on drying characteristics and quality of blueberry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 237−247. ］
［17］ 陈毅, 顾莹, 宋平, 等. 利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏过程中水分含量及迁移变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 321−328. ［CHEN Yi, GU Ying, SONG Ping, et al. Analysis of the moisture content and migration changes of blueberries during storage by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(17): 321−328. ］
［18］ 马彩月, 王岸娜. 绿豆萌动过程中水分分布及营养物质研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 26−32. ［MA Caiyue, WANG Anna. Study on the changes of nutrient and water distribution during the germination of mung bean[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 26−32. ］
［19］ POURBAGHER R, ABBASPOUR-FARD M H, SOHBATZADEH F, et al. Inhibition of enzymes and *Pseudomonas tolaasii* growth on *Agaricus bisporus* following treatment with surface dielectric barrier discharge plasma[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102833.
［20］ ZHANG Yiqin, WANG Hongxuan, CHEN Hangjun, et al. The crucial evaluation indexes and relative measurement methods of edible value for fresh fruits and vegetables: A review[J]. Future Postharvest and Food, 2024, 1(2): 222−236.
［21］ YANG Baiqi, HAN Yanchao, WU Weijie, et al. Impact of melatonin application on lignification in water bamboo shoot during storage[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100254.
［22］ AKCA S, AKPINAR A. The effects of grape, pomegranate, sesame seed powder and their oils on probiotic ice cream: Total phenolic contents, antioxidant activity and probiotic viability[J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101203.
［23］ GE Xiangzhen, ZHU Yan, LI Zhicheng, et al. Preharvest multiple fungicide stroby sprays promote wound healing of harvested potato tubers by activating phenylpropanoid metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 171: 111328.
［24］ SHI Liyu, CAO Shifeng, SHAO Jiarong, et al. Relationship between sucrose metabolism and anthocyanin biosynthesis during ripening in Chinese bayberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(43): 10522−10528.
［25］ 康宏彬, 刘铭, 黄高鹏, 等. 陈皮热泵干燥动力学模型构建和特性分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 94−102. ［KANG Hongbin, LIU Ming, HUANG Gaopeng, et al. Construction and characteristic analysis of drying kinetic model of pericarpium citri reticulatae heat pump[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 94−102. ］
［26］ 唐小闲, 蔡明君, 韦珍珍, 等. 低场核磁共振技术分析杏鲍菇在热风-微波联合干燥过程中的水分变化[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 90−94. ［TANG Xiaoxian, CAI Mingjun, WEI Zhenzhen, et al. Analysis of moisture change of Pleurotu seryngii during hot air-microwave combined drying process by low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(8): 90−94. ］
［27］ 卫志娇, 朱文学, 白喜婷, 等. 基于低场核磁和电镜扫描法对热风干燥花生仁的水分状态研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 213−220. ［WEI Zhijiao, ZHU Wenxue, BAI Xiting, et al. Study on moisture state of peanut kernel dried by hot air based on low field NMR and SEM[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 213−220. ］
［28］ NING Xiaofeng, FENG Yulong, GONG Yuanjuan, et al. Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(4): 1065−1072.
［29］ 屈展平, 任广跃, 张迎敏, 等. 马铃薯燕麦复合面条热泵-热风联合干燥质热传递规律分析[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 57−65.

［QU Zhanping, REN Guangyue, ZHANG Yingmin, et al. Analysis of mass and heat transfer characteristics of potato and oat composite noodles during combined heat pump-hot air drying[J]. Food Science, 2020, 41(5): 57−65.］
［30］ 夏天兰, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(21): 253−256. ［XIA Tianlan, LIU Dengyong, XU Xinglian, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance in determining water contents and other related quality characteristics of meat and meat products: A review[J]. Food Science, 2011, 32(21): 253−256.］
［31］ CHEN Y N, LI M, DHARMASIRI T S K, et al. Novel ultrasonic-assisted vacuum drying technique for dehydrating garlic slices and predicting the quality properties by low field nuclear magnetic resonance[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125625.
［32］ 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116−123. ［LI Dingjin, DUAN Zhenhua, LIU Yan, et al. Variation in water content during vacuum microwave drying of flavored yam chips process analyzed by low-field nuclear magnetic resonance imaging[J]. Food Science, 2019, 40(5): 116−123.］
［33］ 朱文学, 尤泰斐, 白喜婷, 等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 364−370. ［ZHU Wenxue, YOU Taifei, BAI Xiting, et al. Analysis of moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 364−370.］
［34］ 刘宗博. 双孢菇远红外干燥特性及品质的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016. ［LIU Zongbo. Effect of far-infrared drying on characteristics and quality of *Agaricus bisporus*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.］
［35］ 朱洪梅, 王禹心, 刘喻心, 等. 胡萝卜脆片冻干过程中水分、微观结构及品质变化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(11): 42−48. ［ZHU Hongmei, WANG Yuxin, LIU Yuxin, et al. Changes in the moisture, microstructure and quality of carrot chips during freeze-drying[J]. Food Research and Development, 2022, 43(11): 42−48.］
［36］ 李思童. 油茶籽油不同形态酚类化合物抗氧化互作及油相迁移特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. ［LI Sitong. The antioxidant interaction and migration characteristics into oil phase of phenolic compounds in different forms from *Camellia seed* oil[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.］
［37］ LI Shucheng, ZHENG Yi, LI Meiling, et al. Quantitative analyses of major enzyme activities in postharvest fruit[J]. Future Postharvest and Food, 2024, 1(2): 213−221.
［38］ 康新艳. 金银花干燥技术及酚类物质褐变机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2016. ［KANG X Y. Study on drying technology and browning mechanism of phenolic substances in Honeysuckle flower[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2016.］