不同预处理方法下山药切片红外热风联合干燥特性及品质的变化

朱丽春[1]，耿智化[1*]，张继凯[1]，张茜[1,2,3*]，杨旭海[1,2,3]

（1.石河子大学机械电气工程学院，新疆石河子 832000）（2.现代农业机械兵团重点实验室，新疆石河子 832000）

（3.绿洲特色经济作物生产机械化教育部工程研究中心，新疆石河子 832000）

摘要：为了探究不同预处理方法下山药切片红外热风联合干燥特性及品质的变化，该研究采用超声波（UT）、脉冲电场（PEF）、2%柠檬酸（CA）和热水烫漂（HWB）四种预处理方法对山药切片进行处理，分析其对山药切片干燥特性和干燥品质（色差、复水比、多糖含量）的影响。结果表明，不同预处理方式对上述所有因素均有显著影响（P<0.05）。相对于对照组（C），UT、PEF、CA 干燥时间分别缩短了 33.30%、20.01%、13.30%。HWB 由于表面硬化，干燥时间增加了 26.71%。在上述预处理条件下的水分扩散系数 Deff 分别为 1.61×10^{-8}、1.27×10^{-8}、1.18×10^{-8}、8.49×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$。通过变异系数法对山药切片干制品进行综合评分得出结论，UT 指标最好，其色差值、复水比、多糖含量、干燥时间分别为 9.47、3.01 $g\cdot g^{-1}$、25.73 $mg\cdot g^{-1}$、150 min。该研究为山药干燥加工提供了理论依据。

关键词：预处理；山药；干燥速率；品质；变异系数法

文章编号：1673-9078(2026)10-281-289 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1017

Changes in Drying Characteristics and Quality of Yam Slices Subjected to Infrared-assisted Hot Air Drying under Different Pretreatment Methods

ZHU Lichun[1], GENG Zhihua[1*], ZHANG Jikai[1], ZHANG Qian[1,2,3*], YANG Xuhai[1,2,3]

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

(2.Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi 832000, China)

(3.Engineering Research Center for Production Mechanization of Oasis Characteristic Cash Crop, Ministry of Education, Shihezi 832000, China)

Abstract: To elucidate the changes in the drying characteristics and quality of yam slices subjected to infrared-assisted hot air drying under different preprocessing paradigms, the effects of four pretreatment methods, ultrasonic treatment (UT), pulsed electric field (PEF), 2% citric acid (CA), and hot water blanching (HWB), on the drying characteristics and quality of yam slices were investigated. The drying characteristics included drying time and effective moisture diffusivity (D_{eff}), while the quality attributes assessed were color difference, rehydration ratio, and polysaccharide content. The results indicate that all four pretreatment methods significantly affected the drying characteristics and quality attributes of yam slices (P<0.05). Compared with the control group (C), the drying times for yam slices pretreated with UT, PEF, and CA were reduced by 33.30%, 20.01%, and 13.30%, respectively. In contrast, HWB increased drying time by 26.71% due to surface hardening. The Deff values for yam slices under these pretreatment conditions were 1.61×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$ for UT, 1.27×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$ for PEF, 1.18×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$ for CA, and 8.49×10^{-9} $m^2\cdot s^{-1}$ for HWB.

收稿日期：2025-07-21；修回日期：2025-09-23；接受日期：2025-09-26

基金项目：新疆维吾尔自治区“天池英才”引进计划青年博士项目（BT-2025-TCYC-0118）；“天山英才”培养计划“三农”骨干人才项目（CZ002554）；石河子大学大学生创新创业训练计划项目（SRP2025153）

作者简介：朱丽春（1998-），女，博士研究生，研究方向：农产品加工技术与装备，E-mail：zhulichun0204@126.com

通讯作者：耿智化（1995-），男，博士，副教授，研究方向：农产品加工技术与装备，E-mail：gzhjdxy@shzu.edu.cn；共同通讯作者：张茜（1980-），女，博士，教授，研究方向：农产品加工技术与装备，E-mail：zq_mac@shzu.edu.cn

A comprehensive evaluation of the dried yam slices was conducted using the coefficient of variation method. The results showed that the UT pretreatment yielded the best overall quality. Specifically, the color difference value was 9.47, the rehydration ratio was 3.01 g·g^{-1}, the polysaccharide content was 25.73 mg·g^{-1}, and the drying time was 150 min. These findings provide a theoretical foundation for the drying process of yam slices.

Key words: pretreatment; yam; drying rate; quality; coefficient of variation method

引文格式：

朱丽春,耿智化,张继凯,等.不同预处理方法下山药切片红外热风联合干燥特性及品质的变化[J].现代食品科技,2026,42(10): 281-289.

ZHU Lichun, GENG Zhihua, ZHANG Jikai, et al. Changes in drying characteristics and quality of yam slices subjected to infrared-assisted hot air drying under different pretreatment methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 281-289.

山药属于百合科草本植物，主要分布在亚洲地区，尤其在中国、日本和韩国等地广泛种植[1]。山药含有丰富的营养物质，包括蛋白质、维生素 C、多糖以及钙、铁、锌等矿物质，具有多种药用价值，被广泛应用于中医药方中[2]。但新鲜山药含水率高达 84% 左右，极易发生腐败霉烂，且不易运输[3]。干燥作为一种常见的储存方法，能够实现去除水分和提高产品稳定性的目的[4]。

红外热风联合干燥（IR-HAD）作为一种新型的干燥方式，保留了热风干燥（HAD）和红外干燥（IRD）效率高、品质好、操作简单等优点[5]。张继凯等[6]通过对比 IR-HAD 和 HAD 对山药切片干燥速率、单位能耗、色差、复水比、多糖和尿囊素含量的影响。发现与 HAD 相比，IR-HAD 时间短、品质好。Jeevarathinam 等[7]证明了 IR-HAD 是一种适合保持果蔬品质的技术。但 IR-HAD 的产品与新鲜果蔬品质相比还存在一定差距。如何提升干燥品质和干燥速率已是干燥行业所面临的主要问题。

干燥预处理是一种可加速物料干燥速率、提高产品外观和营养价值的一种处理技术[8]。目前，常用的干燥预处理方法有：超声预处理、脉冲电场预处理、冷冻预处理、热水烫漂预处理、化学试剂预处理等[9]。Sun 等[10]研究发现，与对照组相比，柠檬酸预处理、蒸汽烫漂和热水烫漂对去皮马铃薯的干燥速率影响较大。其中柠檬酸预处理 20 min 使维生素 C 保留率最高，颜色更好。Oshimat 等[11]发现烫漂可以提高热风干燥的速度，且可以使柿片色泽更好。另外，热水烫漂之后，柿片的水溶性果胶明显减少，螯合性果胶明显增加。Zhang 等[12]比较了姜片的远红外干燥、IR-HAD 和超声预处理辅助远红外干燥三种方法。结果显示，超声预处理辅助远红外干燥能够提高干燥速率，缩短干燥能耗。该研究显示了超声技术在干燥中的潜力。Li 等[13]研究了脉冲电场、超声和联合预处理对香菇在热风干燥过程中传质、复水能力、微观结构和营养品质的影响，得出联合预处理是一种有前景的方法，可提高香菇的干燥效率和营养价值保护。Ren 等[14]利用 HAD 干制洋葱时发现，经热水烫漂处理后洋葱的有效水分扩散系数明显提升，产品的酚含量、类黄酮含量较高，营养物质得到较好的保留。

目前，尽管预处理技术在果蔬干燥领域已得到广泛关注，但针对山药切片红外－热风联合干燥（IR-HAD）环节，不同预处理手段对其干燥特性及品质属性的影响机制仍缺乏系统研究。超声预处理（UT）、脉冲电场预处理（PEF）、热水烫漂（HWB）和 2% 柠檬酸预处理（CA）可能是山药切片有效的预处理方法，因此，研究将这些方法引入山药的加工中，不仅填补了山药 IR-HAD 预处理优化的理论空白，也为高值化山药干制品的工业化生产提供了可复制的技术路径。具体目的如下：（1）在不同预处理下（UT、PEF、HWB、CA），分析 IR-HAD 对山药切片干燥速率、色差、复水比、微观结构、多糖含量的影响。（2）计算山药切片干燥过程中的有效水分扩散系数，通过变异系数法计算山药切片的综合得分，选择最合适的预处理方法，为今后的实际生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

从石河子市九鼎批发市场购买同一批均匀粗细山药，以保证试验的准确性，放置在 4 ℃的冰箱中冷藏，防止失水，以待使用。在试验之前，清洁山药表面泥垢，去除有伤部分，擦干多余水分，手动去皮并用切片器切成厚度为 6 mm 的均匀切片。使用游标卡尺对每个样品进行测量，去除误差较大的山药切片。在 105 ℃的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 24 h（DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱，上海一恒科技有限公司），测得山药切片的平均初始湿基含水率 84.28[15]。所有制备溶液使用到的试剂均购买于石河子沃德生物科技有限

公司；主要有食品级柠檬酸（纯度 99.50%），苏州仁品化工科技有限公司、食品级葡萄糖（纯度 99.00%），安徽丰原生物技术股份有限公司；分析纯苯酚（纯度：99.00%，CAS 号：108-95-2），武汉克米克生物医药技术有限公司；分析纯硫酸（纯度：98.00%，GB/T601-2016），天津永晟精细化工有限公司。

1.2 试验方法

新鲜山药洗净去皮，用切片器切成厚度为 6 mm 的均匀切片，用电子天平进行称量。每 150 g 为一组，称取 5 组。对山药切片进行不同预处理后，放入红外热风联合干燥机中进行干燥（STC 红外热风联合干燥机，圣泰科有限公司）。每 15 min 测量样品的重量损失，直至达到目标含水率（0.13 $g \cdot g^{-1}$）。试验结束后，立即将样品冷却并用低密度的聚乙烯（LDPE）袋真空密封，以便进一步分析。

预处理工艺后进行干燥，以下是具体的预处理方法：

UT：室温环境下，将山药切片（150±0.50 g）放于含有 5 L、25 ℃去离子水的超声波清洗机中（KQ2200DA 超声波清洗机，昆山市超声仪器有限公司），在 200 W、40 kHz 的参数下进行超声波处理 15 min[16]。

HWB：将山药切片（150±0.50 g）置于恒温水浴锅（HH-ZK4 恒温水浴锅，上海续航科学仪器有限公司）中进行烫漂，水量为 6 L，HWB 温度和时间分别为 99±0.50 ℃和 2 min[17]。

CA：室温环境下，将山药切片（150±0.50 g）浸没于浓度为 2% 的柠檬酸溶液中 30 min，每 5 min 搅动一次[18]。

PEF：将山药切片（150±0.50 g）放入脉冲电场设备中（MSZGYC02-Smart 脉冲电场，常州市兰诺光电科技有限公司），其电场强度为 1.00 $kV \cdot cm^{-1}$，脉冲宽度为 2.50 μs，每秒 200 个脉冲，总处理时间为 10 min[19]。

1.3 干燥特性

在干燥过程中，山药切片的水分比（*MR*）和干燥速率（*DR*）与失水量有关，每 15 min 测量一次，得出 *MR*-*t* 和 *DR*-M_t 曲线。

山药切片干燥过程中的干基含水率可由公式（1）求得[20]。

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \tag{1}$$

式中：

M_t——t 时刻的干基含水率，$g \cdot g^{-1}$ d.b；

W_t——山药切片在任意 t 时刻的总质量，g；

G——样品干物质质量，g。

不同时刻水分比 *MR* 按式（2）计算。

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \tag{2}$$

式中：

MR——水分比；

M_t——t 时刻的干基含水率，$g \cdot g^{-1}$ d.b；

M_0——初始含水率，$g \cdot g^{-1}$ d.b。

山药切片在干燥过程中的 *DR* 按式（3）计算[21]。

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_1 - t_2} \tag{3}$$

式中：

DR——山药切片干燥速率，$g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$；

M_{t1}——t_1 时刻的干基含水率，单位为 $g \cdot g^{-1}$；

M_{t2}——t_2 时刻的干基含水率，单位为 $g \cdot g^{-1}$；

t——时间，h。

1.4 有效水分扩散系数计算

根据菲克第二扩散方程[22]，有效水分扩散系数（D_{eff}）可通过试验样品干燥数据依据 ln*MR*-t 的直线方程进行描述，如式（4）所示。

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \tag{4}$$

式中：

D_{eff}——山药切片的有效水分扩散系数，$m^2 \cdot s^{-1}$；

L——山药切片的切片厚度，m；

t——干燥时间，s。

1.5 色泽测定

选取干燥前后的典型样品，利用色差仪（SMY-2000SF 型色差仪，北京盛名扬科技开发有限公司），依据 CIELAB 表色系统测量 *L**、*a**、*b** 值。利用色泽差异值（Δ*E*）进行评价[23]。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \tag{5}$$

式中：

*L**、*a**、*b**——干燥后山药切片的明亮度、红绿值、蓝黄值；

L、*a*、*b*——鲜山药的明亮度、红绿值、蓝黄值。

1.6 复水比测定

在每个预处理组中各取 2 片山药切片，将干燥后的山药切片在 40 ℃的恒温水中浸泡 2 h，试验完成后取出，并用吸水纸擦干表面水分进行称重[24]。计算如公式（6）所示。

$$R_r = \frac{m_1}{m_2} \tag{6}$$

式中：

R_r——复水比，g·g^{-1}；

m_1——复水后样品的质量，g；

m_2——复水前样品的质量，g。

1.7 微观结构测定

将干燥后样品用液氮速冻处理后立即掰断，自然形成脆片横断面，作为观察样本。用碳导电胶将样本粘在样品托上喷金，进行电子显微镜扫（JEOL，SU3500 电子显微镜，日本东京）。重复观察不同区域的组织结构，选择具有代表性的照片保存，进行下一步分析[25]。

1.8 多糖含量测定

山药多糖的测定[26]：每种葡萄糖标准液（0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 g·mL^{-1}）各取 2 mL 放入比色皿中。用紫外分光光度计（UV-1900i 紫外分光光度计，岛津仪器有限公司）在 490 nm 波长下测的葡萄糖溶液的标准曲线为：y=11.855 7x−0.020 6，R^2=0.956 4。将 6 g 苯酚（108-95-2，武汉克米克生物医药技术有限公司）和 94 g 水放入 250 mL 的烧杯中。充分混合后得到 6% 的苯酚溶液。在每个预处理试验组中准确称取 3 g 山药干制品，并将其粉碎研磨成粉末，然后通过 60 目筛进行筛选，以获得细粉末。将不同预处理后样品的粉末分别放入 10 mL 的试管中，在每个试管中加入 1 mL 6% 的苯酚溶液，并迅速加入 5 mL 硫酸（GB/T 601-2016，天津永晟精细化工有限公司）。充分混合后将试管放入 90 ℃恒温水浴中。15 min 后将试管从恒温水浴中取出，放入冷水浴中 5 min。然后放入离心机（L0-LX-H1850 离心机，上海力辰邦西仪器科技有限公司）进行离心处理（6 000 g，10 min），倒去沉淀，保留上清液于比色皿中，用紫外分光光度计在 490 nm 波长下测定吸光度，并参考葡萄糖标准曲线计算多糖的含量。

1.9 综合评价

该研究采用变异系数权重法[27]对不同预处理下山药切片的色差值、复水比、多糖和干燥时间进行权重分析。

变异系数计算公式如式（7）：

$$V_i=\frac{\sigma_i}{x_i} \tag{7}$$

各样品指标权重计算公式如式（8）：

$$W_i=\frac{V_i}{\sum_{i=1}^{n}V_i} \tag{8}$$

式中：

V_i——第 i 项指标的变异系数；

W_i——第 i 项指标的权重；

σ_i——第 i 项指标的标准差；

x_i——第 i 项指标的平均值。

之后，对各项指标数据标准化处理如式（9）：

$$Z_i=\frac{x_j-x_i}{\sigma_i} \tag{9}$$

式中：

Z_i——标准化后的各指标的数值；

x_j——各指标的试验测量值。

干燥时间和色差值呈负相关，即值越小越优，因此，标准化后需加负号。最后，将各指标的权重和标准化数值相乘，计算出的总和即为总评分。

1.10 数据处理

试验结果以平均值 ± 标准差表示。应用 SPSS 26 和 Excel 2021 进行方差分析，P＜0.05 时认为差异显著，利用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 不同预处理对山药切片IR-HAD特性的影响

经过不同预处理后山药切片的干燥曲线如图 1 所示。从图中可以看出，经过 C、UT、PEF、CA、HWB 处理后，山药切片干燥至目标含水率的时间分别为 225、150、180、195、285 min。与 C 相比，除 HWB 外，其他三种预处理的干燥时间显著减少（P＜0.05），UT 最明显。这是由于超声波的空化效应可引起山药切片内部组织膨胀和收缩，使其结构疏松多孔，形成细胞微通道，有利于内部水分的扩散与蒸发，加速干燥过程[28]。脉冲电场诱导细胞膜的分解，细胞内的水和盐离子受到脉冲电场的作用快速渗出，使样品中的水分到达表面的时间更少，从而加快了干燥速率[29]。柠檬酸可以破坏细胞膜的结构，使得细胞内外的物质交换更为顺畅[30]。山药片内部的水分可以更快地蒸发出来，加快干燥速率[31]。经过 HWB 后的山药切片干燥时间反而增加了 60 min，这可能因为 HWB 后导致山药切片淀粉糊化，使其表面硬化，减少了山药切片在干燥过程中的水分迁移速度和脱水速度[32]，从而增加了干燥时间。

图 1b 为不同预处理下 DR 的曲线，由图可知，整个干燥过程均为降速阶段，干燥速率减慢。在 C、UT、PEF、CA、HWB 条件下，山药切片初始干燥时的干燥速率分别为 4.40、5.81、4.58、4.51、3.45 g·g^{-1}·h^{-1}。在干燥之前，相对于 C，经过预处理后 UT 和 CA 的干

基含水率增大，而 PEF、HWB 的干基含水率减小，因为 UT、CA 处理时浸泡在水里，在渗透压的作用下，周围的水向山药切片内部渗透。PEF 处理时山药切片与外界接触后会有水分的蒸发。山药切片在 HWB 的过程中，其细胞结构会受到破坏，使得细胞内水分释放到热水中，导致干基含水率减少[32]。

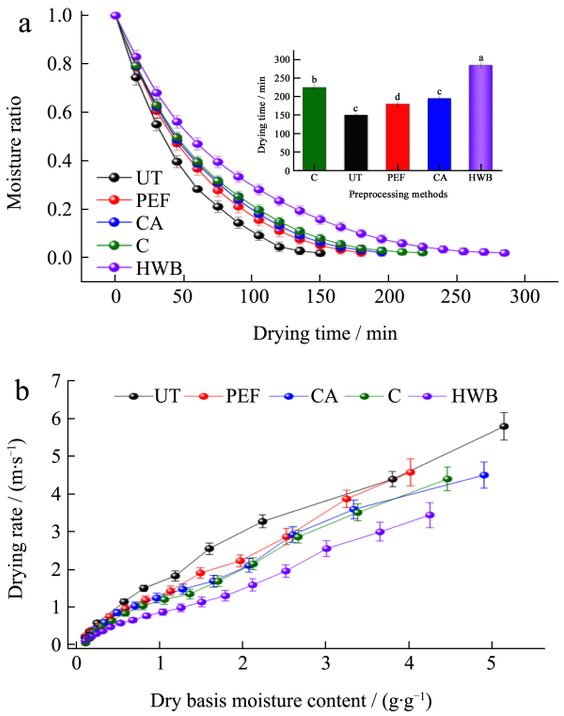


图 1 图 1 不同预处理下山药切片的干燥动力学曲线

Fig.1 Drying kinetic curves of yam slices under different pretreatments

注：（a）山药切片含水率与干燥时间变化关系图，（b）山药切片干燥速率与干基含水率变化关系图。图中标注不同小写字母表示不同样本间有显著性差异（$P<0.05$）。下图同。

2.2 不同预处理对山药切片颜色参数的影响

图 2 为不同预处理下山药切片的颜色指标，图 3 为不同预处理下山药切片的外观。由图 2 可知，干燥后山药切片的 L^*、b^* 值均减少，a^* 均增大。L^* 的变化值相对 a^*、b^* 变化值更明显，对色差的影响最大。相对于 C 来讲，UT、PEF、CA 的 L^* 值有所增加，a^*、b^* 变化不明显，ΔE 显著减少（$P<0.05$），HWB 的 L^*、b^* 均降低，a^* 增加，ΔE 有所增加。

CA 相对 C 的 ΔE 变化最明显，因为柠檬酸具有较强的抗氧化性质，可以有效抑制氧化反应[33]。在干燥过程中，空气中的氧气容易与山药切片发生氧化反应，导致颜色的变化。而 CA 可以减少山药切片在干燥过程中受到氧化的影响，从而降低 ΔE 的变化。UT 可有效缩短山药切片的干燥时间，从而减少褐变降低产品的 ΔE[34]。在 IR-HAD 过程中，PEF 可以提高山药切片的热传导性能，使其更容易、快速、均匀地传递热量，减少了山药片内部温度不均匀的情况，从而使得 ΔE 变小[13]。经过 HWB 后，99 ℃高温的热水破坏了山药的细胞，不利于干燥过程中色泽的保持[35]。

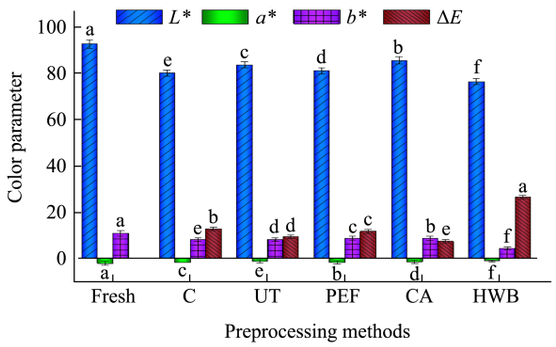


图 2 山药切片不同预处理下的颜色参数

Fig.2 Color parameters of yam slices under different pretreatments

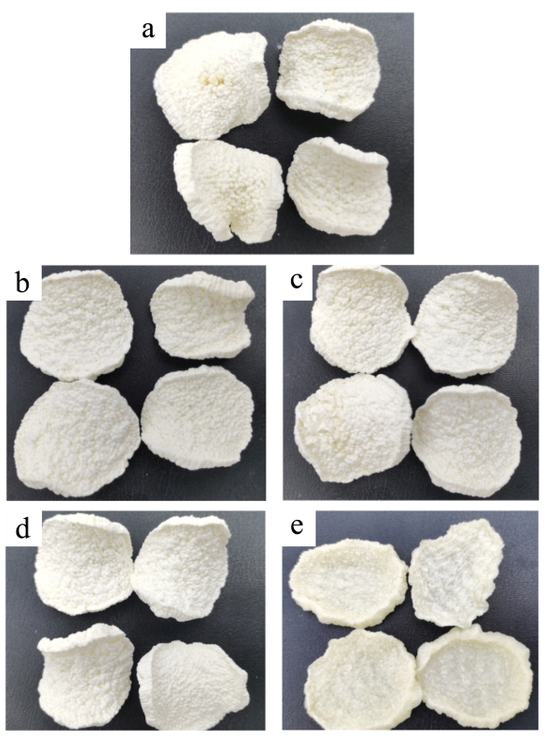


图 3 不同预处理下山药切片的外观

Fig.3 Appearance of yam slices under different pretreatments

注：a 为 C；b 为 UT；c 为 PET；d 为 CA；e 为 HWB。

2.3 不同预处理对山药切片 *Rr* 的影响

Rr 是考察干燥产品的重要指标，*Rr* 越高说明产品内部损害越小，产品质量越高[36]。不同预处理下山药切片的 *Rr* 如图 4 所示。UT 对山药切片 *Rr* 的影响最大，

因为 UT 可以使山药切片表面变疏松，增加山药切片内部的孔隙度和孔隙的连接性，进而增大水分在山药切片内的扩散、蒸发和吸收能力，使 *Rr* 增加[37]。在 PEF 过程中，在高强度的脉冲电场作用下，山药切片内部的细胞会发生破裂或变形，使山药切片在浸泡过程中能更容易吸收水分[38]。柠檬酸作为一种弱酸，会使细胞壁更加松弛，增加细胞的通透性，使干燥过程中内部水分的扩散更加均匀，导致山药切片干燥后吸水性增强，从而 *Rr* 增大[39]。HWB 处理时会导致山药切片淀粉糊化，在表面形成硬层，导致其复水能力变差[32]。

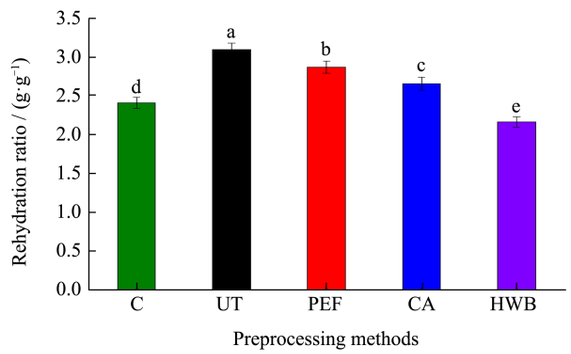


图 4 不同预处理下山药切片的复水比

Fig.4 Rehydration ratios of yam slices under different pretreatments

2.4 不同预处理对山药切片微观结构的影响

不同预处理下山药切片微观结构如图 5 所示。通过扫描电镜观察，C 的微观结构特征为高密度以及存在较少的微孔，表面形状出现坍塌。而 UT、PEF、CA 显示出更多的孔洞，尤其是 UT，可能是在超声波处理期间，会产生一系列非常快速的交替压缩和膨胀循环（海绵效应），在样品表面附近空化气泡的不对称爆炸会在表面方向上产生微流体，从而导致在样品中形成微观通道或孔[40]，这可能是复水性较好的原因。经 PEF 处理后，由于 PEF 会引起电穿孔，会产生了较大的空腔。CA 使山药切片表面更松散，形成更多的裂缝。因为柠檬酸具有一定的酸性，可能使得细胞壁更加松弛，改变细胞的通透性，有利于水分的流动[13]。HWB 的高温使得山药切片出现皱缩，其表面出现硬化和严重坍塌变形，导致孔隙很少，所以复水性较差。

2.5 不同预处理对山药切片多糖含量的影响

不同预处理方式对山药多糖含量影响如图 6 所示。UT 和 CA 的多糖含量大于 C，而 PEF 和 HWB 的多糖含量小于 C。因为在 UT 后，提高了山药切片内部的热交换效率，促进脱水，减少了热风干燥过程中山药切片内部的过热、过度干燥和产生焦变的可能性，从而降低了美拉德反应的程度[41]。在干燥过程中，高温和氧气会引起山药中的氧化反应，导致多糖的降解和失活。柠檬酸具有抗氧化性，经过柠檬酸预处理后，其抗氧化性能有助于抑制氧化反应，保护多糖的完整性和活性[42,43]。在 PEF 过程中，在高强度的脉冲电场作用下，山药切片内部的细胞会发生破裂或变形，加速了细胞内的多糖流失。同时，PEF 可能导致多糖分子的结构解聚和断裂，使得其在干燥过程中更容易发生损失[44]，这也说明高强度的电场处理不适用于多糖的保护。在 HWB 过程中，由于热水的高温能够破坏植物细胞壁中的纤维素和其他多糖结构，使得其中的多糖分子逐渐溶解在水中[32]，由此可见避免热处理可能是多糖保留的重要机制之一。

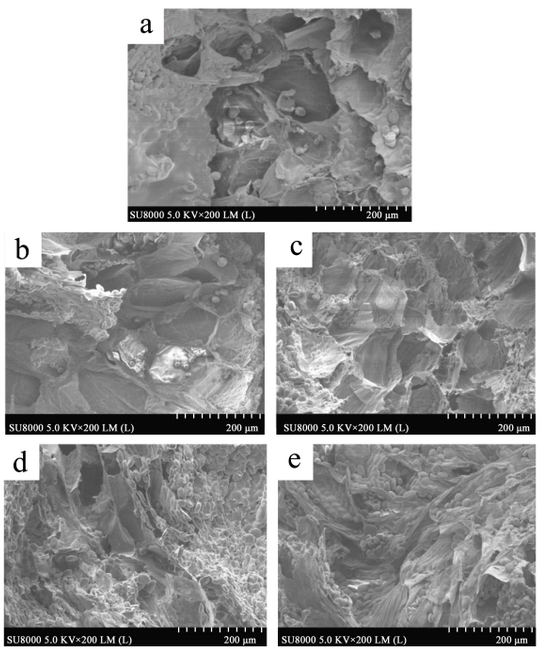


图 5 山药切片不同预处理下的微观结构

Fig.5 Microstructure of yam slices under different pretreatments

注：a 为 UT；b 为 PEF；c 为 CA；d 为 C；e 为 HWB。

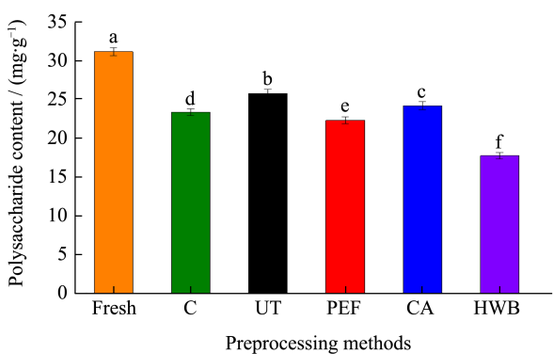


图 6 山药切片不同预处理下的多糖含量

Fig.6 Polysaccharide content of yam slices under different pretreatments

2.6 变异系数法评价

变异系数法能客观反应山药切片品质，由表 1 可知色差所占权重最大，为 0.52；多糖含量占比最小为 0.12。

表 1 指标权重

Table 1 Indicator weights

评价指标	标准差	平均值	变异系数	权重
色差	7.11	13.85	0.51	0.52
复水比	0.33	2.64	0.13	0.13
多糖含量	2.70	22.64	0.12	0.12
干燥时间	45.89	207.00	0.22	0.23

表 2 山药切片品质评分

Table 2 Quality scores of yam slices

指标	C	CA	UT	PEF	HWB
色差	−0.16	0.66	0.36	0.01	−0.39
复水比	−0.09	0.01	0.18	0.09	−0.2
多糖含量	0.03	0.07	0.14	−0.02	−0.22
干燥时间	−0.09	0.06	0.29	0.14	−0.39
综合评分	−0.31	0.80	0.96	0.22	−3.19

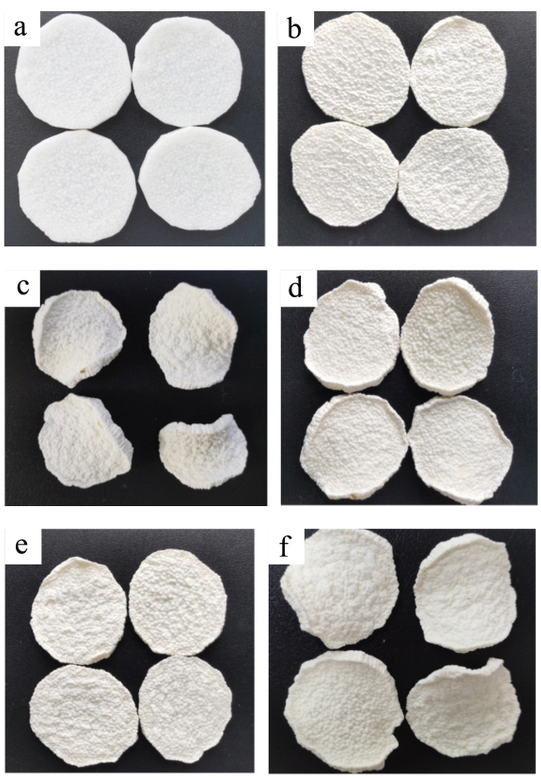


图 7 最优预处理下山药切片干燥外观变化过程

Fig.7 Changes in appearance of yam slices during drying under the optimal pretreatment

注：a 为 0 min；b 为 30 min；c 为 60 min；d 为 90 min；e 为 120 min；f 为 150 min。

由表 2 综合评分可知，UT 的品质最优，综合评分为 0.96。其次是 CA，综合评分为 0.8，HWB 的综合评分最低，品质最差。图 8 为最优预处理时，山药切片的干燥试验过程。

2.7 不同预处理下的有效水分扩散系数

由图 1 干燥速率曲线可知，山药切片干燥过程主要为降速阶段，因此，可以用 Fick 第二定律来描述[22]。表 3 总结了不同预处理方式对 D_{eff} 的影响。由表可知，各拟合方程的 R^2 在 0.982 4~0.995 6 之间，表明拟合效果较好。C 的 D_{eff} 为 9.91×10^{-9}。UT、PEF、CA、HWB 的 D_{eff} 分别为 1.61×10^{-8}、1.27×10^{-8}、1.18×10^{-8}、8.49×10^{-9}，除 HWB 外，其余三组的 D_{eff} 均大于 C。其中 UT 后山药切片的 D_{eff} 最大，是 C 的 1.63 倍。原因可能是 UT 对山药切片孔隙结构的改善，提高了水分的扩散传输能力，进而增大了山药切片内部水分有效扩散系数。HWB 的 D_{eff} 最低，因为热水的高温导致山药切片淀粉糊化，使其表面硬化，减少了水分扩散[32]。

表 3 不同预处理下的水分有效扩散系数

Table 3 Effective moisture diffusivity of yam slices under different pretreatments

温度/℃	线性方程	R^2	D_{eff}/($m^2\cdot s^{-1}$)
C	$lnMR$=-0.275 25t+0.109 54	0.995 6	9.91×10^{-9}
CA	$lnMR$=-0.327 48t+0.174 96	0.989 45	1.18×10^{-8}
UT	$lnMR$=-0.446 81t+0.224 03	0.982 4	1.61×10^{-8}
PEF	$lnMR$=−0.352 94t+0.188 8	0.987 04	1.27×10^{-8}
HWB	$lnMR$=−0.235 85t+0.125 98	0.993 44	8.49×10^{-9}

3 结论

不同预处理对山药切片 IR-HAD 干燥速率均有显著影响（$P<0.05$），各干燥过程均为降速干燥。其中 UT 干燥时间最短，D_{eff} 最大，其值分别为 150 min、1.61×10^{-8} $m^2\cdot s^{-1}$。通过变异系数法对各组山药切片干制品的色差、复水比、微观结构、多糖含量进行了对比，得出 UT 的指标最好，其次分别为 CA、PEF、HWB。

该研究旨在探究不同预处理对山药切片 IR-HAD 的干燥特性和品质的影响，但未对皂苷、多酚等多个指标进行深入测定与分析，未来的研究可以考虑更多的品质特征，并进一步优化预处理参数，从而达到更好的干燥效果。

参考文献

[1] GUO S, ZHAO X, MA Y, et al. Fingerprints and changes analysis of volatile compounds in fresh-cut yam during yellowing process by

using HS-GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130939.
[2] 石爱文,李爽,刘俊潼,等.山药趁鲜切制及不同干燥方式对饮片质量的差异比较[J].时珍国医国药,2024,35(12):2783-2789.
[3] MENG Z, CUI X, ZHANG H, et al. Study on drying characteristics of yam slices under heat pump-electrohydrodynamics combined drying [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 41(c): 102601.
[4] 谭宏渊,凌玉钊,黄丽琪,等.不同预处理对热风干燥山药片品质特性及微观结构的影响[J].食品工业科技,2023,44(20):43-52.
[5] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 75-87.
[6] 张继凯,郑霞,肖红伟,等.山药片红外联合热风干燥热质传递收缩模拟与品质[J].农业工程学报,2024,40(6):134-145.
[7] JEEVARATHINAM G, PANDISELVAM R, PANDIARAJAN T, et al. Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices:Effect on drying rate and quality parameters [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 144: 111258.
[8] BEZERRA J D, LAMARAO C V, SANCHES E A, et al. Cold plasma as a pre-treatment for processing improvement in food: A review [J]. Food Research International, 2023, 167: 1011.
[9] LLAVATA B, GARCIA-PEREZ J V, SIMAL S, et al. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review [J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 35: 20-26.
[10] SUN X F, JIN X, FU N, et al. Effects of different pretreatment methods on the drying characteristics and quality of potatoes [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(11): 5767-5775.
[11] OSHIMA T, KATO K, IMAIZUMI T. Effects of blanching on drying characteristics, quality, and pectin nanostructures of dried cut-persimmons [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111094.
[12] ZHANG D Y, HUANG D, ZHANG Y X, et al. Ultrasonic assisted far infrared drying characteristics and energy consumption of ginger slices [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 92: 106287.
[13] LI X, LI J, WANG R, et al. Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms. [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150: 112008.
[14] REN F Y, PERUSSELLO C A, ZHANG Z. H, et al. Enhancement of phytochemical content and drying efficiency of onions (*Allium cepa* L.) through blanching [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1300-1309.
[15] BAO X, MIN R, ZHOU K, 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.
[16] AYDAR A Y, AYDIN T, YILMAZ T, et al. Investigation on the influence of ultrasonic pretreatment on color, quality and antioxidant attributes of microwave dried *Inula viscosa* (L.). [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106184.
[17] IGNACZAK A, SALAMON A, KOWALSKA J, et al. Influence of pre-treatment and drying methods on the quality of dried carrot properties as snacks [J]. Molecules, 2023, 28(17): 6407.
[18] TEPE F B. Impact of pretreatments and hybrid microwave assisting on drying characteristics and bioactive properties of apple slices. [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(10): 17067.
[19] YU Y, JIN T Z, FAN X, et al. Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments [J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1219-1225.
[20] WANG S, BI Y, ZHOU Z, et al. Effects of pulsed vacuum drying temperature on drying kinetics, physicochemical properties and microstructure of bee pollen. [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 169: 113966.
[21] CHUWATTANAKUL V, EIAMSAARD S. Hydrodynamics investigation of pepper drying in a swirling fluidized bed dryer with multiple-group twisted tape swirl generators. [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 13: 100389.
[22] DEHGHANNYA J, POURAHMAD M, GHANBARZADEH B, et al. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 135: 30-43.
[23] BAI R X, SUN J R, QIAO X G, et al. Hot air convective drying of ginger slices: drying behaviour, quality characteristics, optimisation of parameters, and volatile fingerprints analysis [J]. Foods, 2023, 12(6): 1283.
[24] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102948.
[25] BAI J W, WANG Y C, CAI J R, et al. Three-dimensional appearance and physicochemical properties of *Pleurotus eryngii* under different drying methods [J]. Foods, 2023, 12(10): 12101999.
[26] ZHOU S Y, HUANG G L, CHEN G Y. Extraction, structural analysis, derivatization and antioxidant activity of polysaccharide from Chinese yam [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130089.
[27] HAN Y, LIU J, LI J, et al. Novel risk assessment model of food quality and safety considering physical-chemical and pollutant indexes based on coefficient of variance integrating entropy weight. [J]. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162730.
[28] WU X F, ZHANG M, YE Y, et al. Influence of ultrasonic pretreatments on drying kinetics and quality attributes of sweet potato slices in infrared freeze drying (IRFD) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109801.
[29] CHAUHAN O P, SAYANFAR S, TOEPFL S. Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2018, 55(6): 2251-2258.
[30] MIRBAGHERI M, NAHVI I, EMTIAZI G, et al. Enhanced production of citric acid in *Yarrowia lipolytica* by triton X-100 [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 165(3-4): 1068-1074.
[31] PEREIRA P H F, WALDRON K W, WILSON D R, et al. Wheat straw hemicelluloses added with cellulose nanocrystals and citric acid, effect on film physical properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 164: 317-324.
[32] XIAO H W, LIN H, YAO X D, et al. Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying [J]. International Journal of Food Engineering,

2009, 5(5): 1556-3758.

[33] ROY M, BULBUL M A I, HOSSAIN M A, et al. Study on the drying kinetics and quality parameters of osmotic pre-treated dried Satkara (*Citrus macroptera*) fruits [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(1): 471-485.

[34] SHANG J W, ZHANG Q, WANG T X, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on the far-Infrared drying process and quality characteristics of licorice [J]. Foods, 2023, 12(12): 12122414.

[35] ONYANGO S O, ABONG G O, OKOTH M W, et al. Effect of pre-treatment and processing on nutritional composition of cassava roots, millet, and cowpea leaves flours [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5: 625735.

[36] BISWAS R, HOSSAIN M A, ZZAMAN W. Thin layer modeling of drying kinetics, rehydration kinetics and color changes of osmotic pre-treated pineapple (*Ananas comosus*) slices during drying: Development of a mechanistic model for mass transfer [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 80: 103094.

[37] HUANG W Y, HUANG D, QIN Y T, et al. Ultrasound-assisted hot air drying characteristics of Phyllanthus emblica [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(4): 14286.

[38] FAUSTER T, GIANCATERINO M, PITTIA P, et al. Effect of pulsed electric field pretreatment on shrinkage, rehydration capacity and texture of freeze-dried plant materials [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 121: 108937.

[39] SRIKANTH K S, SHARANAGAT V S, KUMAR Y, et al. Convective drying and quality attributes of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 8-16.

[40] FENG Y B, YU X J, YAGOUB A 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.

[41] XU J, WANG D, LEI Y, et al. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of Tremella fuciformis [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105963.

[42] RAVN H C, MEYER A S. Chelating agents improve enzymatic solubilization of pectinaceous co-processing streams [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(2): 250-257.

[43] BOCHAROVA O. New evidence of appropriate fruit juice redox conditions for citric acid acting as a proton-carrier on Pt electrode: the effect on evaluating antioxidant properties [J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22(6): 1957-1961.

[44] 欧阳华峰.高压脉冲电场预处理对淮山微波真空干燥的影响[D].长沙:湖南农业大学,2020.