

怀山药恒温及变温红外喷动床干燥动力学、均匀性及品质特性研究

潘 宏¹, 李琳琳^{1,2}, 任广跃^{1,2}, 段 续^{1,2*}

(¹ 河南科技大学食品与生物工程学院 河南洛阳 471023

² 农产品干燥技术与装备河南省工程技术研究中心 河南洛阳 471023)

摘要 采用恒温干燥(40,50,60,70℃)和阶段变温干燥(阶段升温 and 阶段降温)工艺对怀山药进行红外喷动床干燥(IRSBD)处理,研究其对干燥动力学、均匀性及品质特性(质构、复水性能、总酚含量、微观结构和皱缩率)的影响。对怀山药红外喷动床干燥曲线的数学模型拟合结果表明,Midilli 模型 R^2 最大 (0.99989),RMSE 和 χ^2 最小 (分别为 0.00319 和 1.69872×10^{-5}),最适合描述怀山药 IRSBD 动力学。对比不同干燥工艺发现,恒温干燥条件下,提高干燥温度有利于缩短干燥时间,降低能耗。阶段升温干燥能耗仅高于 70℃ 恒温干燥,其干燥均匀性最好,样品总酚含量最高为 $(85.25 \pm 7.41) \text{mg GAE}/100 \text{g DW}$,皱缩率及硬度最低,分别为 $(74.3 \pm 3.96)\%$ 和 $(24.95 \pm 7.41) \text{N}$,且有良好的色泽。阶段降温干燥样品具有较高的平衡复水比和脆度,然而在干燥时间、能耗、均匀性及产品硬度、皱缩率和总酚含量方面没有显著优势。结论:阶段升温干燥是怀山药 IRSBD 更为理想的干燥工艺。研究结果可为 IRSBD 技术应用于农产品加工提供理论参考。

关键词 怀山药; 红外喷动床干燥; 阶段变温干燥; 干燥品质; 干燥均匀性

文章编号 1009-7848(2024)10-0227-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.021

怀山药为薯蓣科薯蓣属植物的块茎,是药食同源食品^[1-3]。怀山药中含有蛋白质、氨基酸、可溶性糖,以及多酚、皂苷和山药素等多种营养成分和活性物质,具有降血糖、降血脂、抗突变、抗氧化等药理作用,在糖尿病和癌症等疾病临床治疗中得以应用,备受消费者青睐^[4-9]。

新鲜怀山药水分含量高,在储存和运输过程中容易腐败变质,导致产品质量劣变^[10]。工业上通常采用干燥的方法将产品水分活度降到安全水平以下来延长其保质期^[11-12]。随着国内外干燥技术研究的深入,目前新型干燥技术趋向于将 2 种或 2 种以上干燥技术联合,以克服单一干燥技术的缺陷。红外喷动床干燥(Infrared-assisted spouted bed drying, IRSBD)作为一种新型联合干燥技术,改善了红外干燥均匀性差和喷动床干燥效率低的缺点,具有干燥时间短,能耗低,干燥均匀性好等优势,目前已应用于青豆、亚麻籽、香菇、花生、益生菌山药零食、咖啡豆等食品中^[13-18]。如:段续等^[19]利用红外喷动床干燥技术对香菇进行干燥,通过单因素实验确定了最佳工艺参数,获得节

能、低耗的干燥效果以及品质较优的干香菇;朱凯阳等^[20]采用 IRSBD 对带壳鲜花生进行干燥,结果表明 IRSBD 比热风干燥、红外干燥、热风-红外干燥能耗更低,脱水速率更高,且干燥产品品质更好。段续等^[21]采用 IRSBD 干燥玫瑰花瓣,发现干燥温度和出风风速对干燥样品的色泽、复水比、微观结构和活性物质含量有显著影响,为 IRSBD 的研究提供了参考。然而,这些研究在 IRSBD 全过程中均采用固定的干燥条件对样品进行干燥,而样品在干燥过程中的组织结构、水分状态、化学成分等处于不断变化的状态,固定干燥温度和风速可能不是获得高质量产品的最佳方案。目前尚缺乏动态参数条件下的红外喷动床干燥研究。此外,对某一干燥技术的评价不仅限于干燥效率和产品品质,干燥均匀性也是评估干燥技术优、劣的重要指标^[22]。喷动床可以提高干燥室中怀山药接受红外辐射的均匀性,减少干燥不均匀引起的不同样品间较大的品质差异。提高干燥均匀性是红外喷动床干燥的突出优势,而目前对红外喷动床干燥的研究多集中于干燥效率和产品品质上,对其干燥均匀性的研究较少。

由于干燥过程中怀山药块的质量逐渐减小,因此为使样品在干燥过程中喷动高度保持在合适的范围,避免过度喷动,本研究基于前期试验确定

收稿日期: 2023-10-29

基金项目: 河南省科技攻关项目(222102520011)

第一作者: 潘宏,男,硕士生

通信作者: 段续 E-mail: duanxu_dx@163.com

的阶段降风速方案,探讨恒温干燥和阶段变温干燥对怀山药干燥特性、能耗、品质特性以及干燥均匀性的影响。以节能、保质为目标,确定较优的干燥条件,旨在为 IRSBD 在怀山药中的应用提供技术支持。

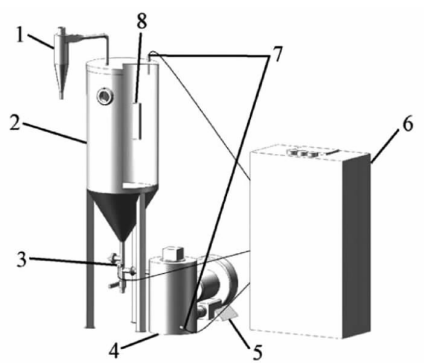
1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究使用的怀山药购于河南省焦作市温县。选取长度 70~80 cm,直径 2~2.5 cm,且外表无损伤的新鲜山药,在低温阴凉环境中储存备用,放置时间不超过 1 周。

1.2 仪器与设备

红外喷动床干燥机由本团队自行研制,设备结构如图 1 所示。



注:1-旋风分离器;2-干燥仓;3-出料口;4-电加热器;5-风机;
6-控制柜;7-温度传感器;8-红外加热板。

图 1 红外喷动床干燥机结构图

Fig.1 Structure diagram of infrared-assisted spouted bed dryer

其它仪器与设备:XT-I5 型色差仪,美国 X-rite 公司;SMS TA.XT Epress 食物物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;TG16-WS 型离心机,湖南湘仪仪器有限公司;UV4800 型紫外可见分光光度计,上海尤尼柯仪器有限公司;晶玻 HH-2 型恒温水浴锅,常州普天仪器制造有限公司;TM3000 SEM,日本日立高新技术公司;DT 型电子分析天平,常熟市嘉衡天平仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 预处理 将怀山药洗净去皮后,使用切丁器将其切成 12 mm×12 mm×12 mm 的方块。经测

定,新鲜怀山药的干基含水率为(4.05±0.19) g/g。将切好的怀山药块迅速置于 95 ℃热水中漂烫 1 min,期间用玻璃棒不断搅拌使怀山药块表面与热水均匀接触。漂烫后的怀山药块用去离子水冷却 2 min 至室温,用滤纸吸干表面水分后,备用。

1.3.2 红外喷动床干燥工艺 将喷吹罐温度预热至设定温度后,称取 100 g 经预处理过的怀山药块倒入干燥箱中进行干燥脱水。IRSBD 恒温干燥设置干燥温度为 40,50,60,70 ℃;阶段升温干燥(Staged rising temperature drying, SRTD)设置初始温度为 40 ℃,每间隔 30 min 升高 10 ℃,到达 70 ℃后固定干燥温度直至干燥终点;阶段降温干燥(Staged falling temperature drying, SFTD)设置初始温度为 70 ℃,每间隔 30 min 降低 10 ℃,到达 40 ℃后固定干燥温度直至干燥终点。在所有干燥过程中,初始出风风速为 7.5 m/s,随后每间隔 30 min 降低 1 m/s,降低至 4.5 m/s 后固定风速继续干燥,直至干燥终点。在试验中每隔 30 min 测定 1 次怀山药块质量,直至干燥样品的干基含水率降低至 0.05 g/g(干基)以下。每组进行 3 次平行重复试验。

1.3.3 水分含量测定 采用《食品安全国家标准食品中水分的测定》(GB 5009.3-2016)中的方法测定怀山药的水分含量(Moisture content, MC),按照公式(1)计算:

$$MC = \frac{m_0 - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: m_0 和 m_d 分别为样品初始质量和样品干物质质量, g。

1.3.4 水分比 水分比(Moisture ratio, MR)是指在干燥过程中样品的剩余含水率,按照公式(2)计算:

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

式中: M_t 为 t 时怀山药的干基含水率, g/g; M_e 为干燥结束时怀山药的干基含水率, g/g; M_0 为新鲜怀山药干基含水率, g/g。

1.3.5 干燥模型 为更好地预测 IRSBD 过程中怀山药水分变化规律,本研究选取了 10 个适合怀山药 IRSBD 的数学模型(表 1),用于拟合干燥曲线,评价干燥动力学。

表 1 干燥动力学模型

Table 1 Mathematical models for drying kinetics

序号	名称	模型方程
1	Logarithmic	$MR=a \exp(-kt)+c$
2	Page	$MR=\exp(-kt^n)$
3	Lewis	$MR=\exp(-kt)$
4	Two-term exponential	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$
5	Midilli	$MR=a \exp(-kt^n)+bt$
6	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$
7	Verma	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$
8	Henderson and Pabis	$MR=a \exp(-kt)$
9	Modified page	$MR=\exp[-(kt)^n]$
10	Simplified Fick's diffusion	$MR=a \exp(-c t l^{-2})$

通过拟合结果参数——决定系数(R^2)、均方根误差(Root mean squared error, RMSE)和卡方(χ^2)评价干燥动力学数学模型拟合程度。 R^2 越接近 1, RMSE 和 χ^2 值越接近 0, 则表示干燥模型的拟合程度越好。

1.3.6 能耗测定 通过读取干燥开始和结束时的电表示数获得干燥所消耗的电量,并计算能耗,单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

1.3.7 样品表面温度测定 每隔一段时间随机取出 10 个样品并置于塑料隔热板上,用红外热像仪测定干燥期间怀山药块的表面温度,获取的红外热像图用 FLIR Thermal Studio 软件处理。

1.3.8 干燥均匀性测定 在干燥终点随机取出 10 个怀山药块,分别测量样品的表面温度、皱缩率和色差值,并采用相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)评价温度均匀性、皱缩率均匀性和色泽均匀性。RSD 根据公式(3)计算:

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{\bar{X}} \quad (3)$$

式中: $X_1 \cdots X_n$ 为样品测定指标实际值; \bar{X} 为测定指标的平均值;RSD 结果以百分比形式表示,数值越低代表其温度、皱缩率、色差均匀性越好。

1.3.9 复水能力测定 复水比(Rehydration ratio, RR)代表干燥产品再水化的能力。将 5 g 干燥怀山药块浸泡在装有 200 mL 去离子水的烧杯里,放置于 25 ℃的水浴锅中进行复水性能测定,每隔一段时间沥干表面水分后测定复水样品质量。RR 按照公式(4)计算:

$$RR = \frac{m_r}{m} \quad (4)$$

式中: m 和 m_r 分别为干燥样品和复水后样品的质量, g。

1.3.10 色泽测定 干燥样品的色泽采用 XT-I5 型色差仪进行测定。以仪器白色和黑色标准板校准,测量干燥样品的 L^* (亮度)、 a^* (红绿程度)和 b^* (黄蓝程度)值。用总色差(ΔE)表示怀山药干燥前、后的颜色变化,按照公式(5)计算:

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

式中: L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为新鲜怀山药的亮度、红蓝值和黄绿值; L^* 、 a^* 、 b^* 分别为干燥后怀山药的亮度、红蓝值和黄绿值。

1.3.11 总酚含量测定 将怀山药样品粉碎后过 60 目筛,称取 1.0 g 粉末,加入 20 mL 1% HCl-甲醇溶液,在 4 ℃条件下避光超声提取 20 min 后,离心(4 000 r/min, 10 min)提取上清液。重复提取 3 次后,合并上清液并定容至 20 mL 待用。取 0.5 mL 上清液于玻璃试管中,加入 1 mL 福林酚试剂,均匀混合后静置 5 min。然后加入 3 mL Na_2CO_3 (75 g/L),用 1% HCl-甲醇溶液定容至 10 mL 后,室温下避光水浴 60 min。以 1% HCl-甲醇溶液为对照,在波长 760 nm 下测定样品的吸光度,以没食子酸标准曲线($y=8.26162x+0.00124$, $R^2=0.9987$)作对照计算样品中的总酚含量 (Total phenolic content, TPC), TPC 以没食子酸当量 (Gallic acid equivalents, GAE)表示,单位为 $\text{mg GAE}/100 \text{ g}$ 干重(Dry weight, DW)。

1.3.12 皱缩率测定 参考严启梅^[23]的方法测定

干燥样品的皱缩率。

1.3.13 质构特性测定 参考李琳琳^[24]的方法测定干燥样品的硬度和脆度。物性分析仪测试参数为:测试前、中、后速度分别为 2,1,2 mm/s,触发力 10 g,应变距离 50%。试验结果以最大力表征样品硬度,以力峰数量和第一力峰斜率来表征脆度。

1.3.14 微观结构 将干燥怀山药块切成 3 mm 薄片,利用扫描电镜在 180 倍下观察样品的微观形貌。

1.4 数据统计分析

每组试验平行重复 3 次,采用 Excel 2019 处理数据,Origin Pro 2021 进行图形绘制和模型拟合,采用 IBM SPSS Statistics 24 进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan's 多重比较进行显著性分析,显著性水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 干燥特性

不同干燥工艺条件下怀山药 IRSBD 干燥特性如图 2 所示。干燥前期,山药块在高温、高速气流和红外辐射的作用下迅速升温,内部水分蒸发,MR 快速下降。在干燥中后期,山药块水分迁移速度变慢,导致 MR 下降缓慢,直至干燥终点。导致干燥后期 MR 下降缓慢的原因有:1) 山药块的水分状态在干燥过程中逐渐变化,自由水逐渐减少,水分脱除变得困难,导致干燥速率降低;2) 在干燥过程中,样品内部逐渐积累体积热,使分子链内部化学键强度和交联度增强,形成更有序和紧凑的

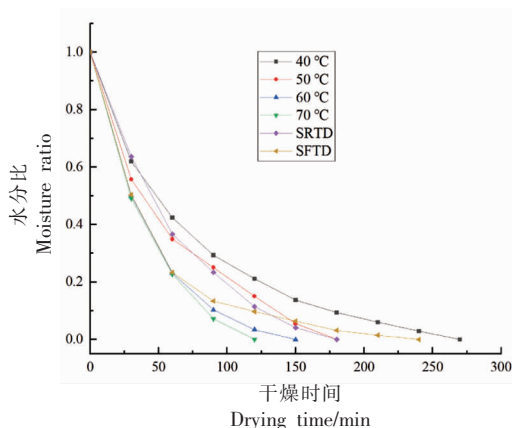


图2 不同工艺条件下 IRSBD 怀山药的 MR 变化曲线
Fig.2 MR curves of Chinese yam in IRSBD under different process conditions

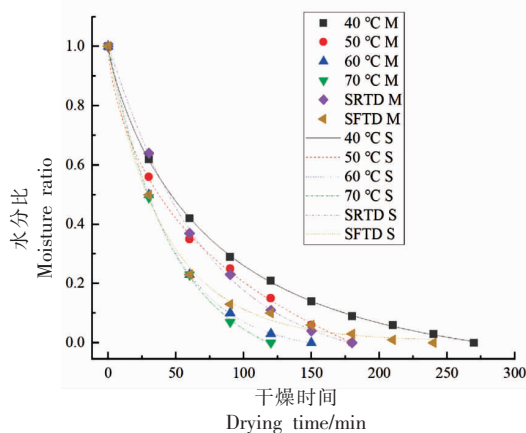
晶体结构,干燥相同质量的水分需要吸收更多的能量^[25];3)干燥引起的样品体积收缩使内部孔道结构坍塌,水分迁移的路径受阻。

在 IRSBD 的恒温干燥中,干燥温度越高,山药块到达干燥终点所需的时间越短。在 70 °C 干燥条件下,干燥时间最短,为 120 min。SRTD 干燥时间和 50 °C 恒温干燥相当;与 SFTD 相比,SRTD 能更快到达干燥终点,缩短干燥时间 25%。Li 等^[26]表明 IRSBD 干燥时间受干燥温度和气流速度的影响,且温度是影响水分蒸发的关键因素。IRSBD 过程中,样品受热气流和红外辐射的共同作用,干燥温度升高,使样品在单位时间内吸收更多热能和红外辐射能,改善水分子动能,因而干燥所需时间缩短^[27]。

2.2 干燥动力学

2.2.1 干燥动力学模型 本试验选取 10 种常用干燥模型对 40 °C 干燥条件的数据进行拟合,所得结果如表 2 所示。由表 2 可知,Midilli 模型具有最大的 R^2 值和最小的 RMSE 和 χ^2 值,分别为 0.99989,0.00319 和 1.69872×10^{-5} ,拟合度最好,因此,Midilli 模型最适合描述怀山药 IRSBD 动力学。

2.2.2 模型的验证 为了验证 Midilli 模型的准确性,对 IRSBD 所有工艺条件下的试验数据进行拟合分析,结果由图 3 和表 3 所示。模型预测值与实际值拟合度较高,说明 Midilli 模型能较好反映怀山药 IRSBD 过程中 MR 的变化规律,可以用该模型对 IRSBD 怀山药的过程进行分析和预测。



注:M 代表实际值,S 代表预测值。
图3 不同工艺条件下 IRSBD 怀山药 MR 的实际值与预测值
Fig.3 Experimental and predicted MR values of Chinese yam in IRSBD under different process conditions

表 2 怀山药 IRSBD 动力学模型拟合参数

Table 2 Parameters fitted for the dynamic model of IRSBD for Chinese yams				
序号	名称	R^2	RMSE	χ^2
1	Logarithmic	0.99696	0.01655	3.92006×10^{-4}
2	Page	0.99809	0.01315	2.15697×10^{-4}
3	Lewis	0.99657	0.01761	3.44552×10^{-4}
4	Two-term exponential	0.99733	0.01552	3.01715×10^{-4}
5	Midilli	0.99989	0.00319	1.69872×10^{-5}
6	Wang and Singh	0.95427	0.06427	0.00516
7	Verma	0.99864	0.01105	1.74946×10^{-4}
8	Henderson and Pabis	0.99696	0.01655	3.43039×10^{-4}
9	Modified page	0.99809	0.01311	2.15534×10^{-4}
10	Simplified Fick's diffusion	0.99456	0.02216	7.01469×10^{-4}

表 3 怀山药 IRSBD 动力学 Midilli 模型拟合参数

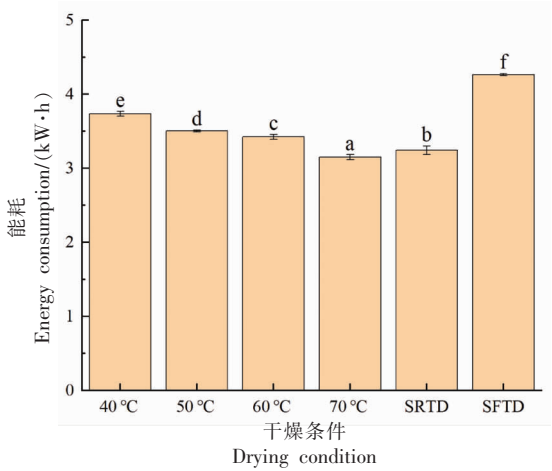
Table 3 Parameters fitted for the Midilli model of IRSBD for Chinese yams			
干燥工艺	R^2	RMSE	χ^2
40 ℃	0.99989	0.003192538	1.69872×10^{-5}
50 ℃	0.9993	0.00708969	1.67546×10^{-4}
60 ℃	0.99998	0.001083328	5.86801×10^{-6}
70 ℃	0.9998	0.00362581	1.31465×10^{-4}
SRTD	0.99957	0.00582837	1.13233×10^{-4}
SFTD	0.99781	0.006154161	3.78737×10^{-4}

2.3 干燥能耗

在不同工艺条件下的怀山药 IRSBD 能耗如图 4 所示,工艺条件对怀山药 IRSBD 能耗有显著影响($P<0.05$)。在恒温干燥条件下,干燥能耗主要受干燥时间的影响。干燥温度越高,干燥时间越短,干燥能耗越低。70 ℃恒温干燥用时 120 min,能耗最低,为 3.15 kW·h,与 40、50、60 ℃干燥相比,干燥时间分别减少了 55.55%、33.33%、20%,干燥能耗分别降低 15.78%、10%、7.89%。SRTD 能耗仅次于 70 ℃,而 SFTD 能耗最高。采用 SRTD 或较高的恒温干燥温度可以降低干燥能耗,减少生产加工成本。

2.4 干燥均匀性评价

红外喷动床干燥机中喷动系统的引入以期在干燥过程中通过喷动改变干燥样品的位置,从而提高干燥均匀性^[28]。为了评价 IRSBD 均匀性,随机选取干燥终点 10 粒怀山药样品测定其温度、皱缩率、 ΔE ,并进行数据分析,结果见表 4。就温度均匀性而言,IRSBD 所有干燥组样品的温度 RSD 值均



注:不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

图 4 不同工艺条件下 IRSBD 干燥能耗
Fig.4 Energy consumption of IRSBD under different process conditions

较小。与采用脉冲喷动协同低频/高频微波冷冻干燥的山药块相比,IRSBD 所有干燥组样品的温度 RSD 值均更低,表现出更好的干燥均匀性^[24]。SRTD 样品组的 RSD 值最小,仅为 1.2%,在此条

件下,干燥样品的表面温度分布更加均匀。SRTD与恒温干燥相比具有更好的温度均匀性。SFTD的RSD值最大,温度均匀性最差。对于皱缩率均匀性,40℃样品组的皱缩率均匀性最好,70℃干燥样品的皱缩率均匀性最差,其次是SRTD和SFTD。阶段变温干燥比恒温干燥更有利于改善 ΔE 的均匀性。SRTD的 ΔE 均匀性最好,其次是SFTD。不同IRSBD工艺会对干燥均匀性产生影响,综合比较,SRTD有利于怀山药IRSBD均匀性提升。

表4 不同IRSBD工艺条件下干燥终点怀山药的温度、皱缩率、 ΔE 均匀性分析

Table 4 Analysis of temperature, shrinkage ratio, and ΔE uniformity of dried Chinese yams under different IRSBD process conditions at the drying endpoint

干燥工艺	40℃	50℃	60℃	70℃	SRTD	SFTD
温度 RSD/%	1.99	1.36	1.49	1.63	1.20	2.17
皱缩率 RSD/%	2.82	5.09	4.58	6.02	5.33	5.17
ΔE RSD/%	16.45	27.23	20.33	16.14	15.19	15.30

2.5 品质特性

2.5.1 总酚含量和色泽 多酚是怀山药中重要的抗氧化生物活性物质^[29]。表5为IRSBD不同干燥工艺条件下怀山药的总酚含量。与新鲜山药相比,漂烫后的怀山药TPC明显降低($P<0.05$),损失约17.88%。多酚是水溶性、热敏性物质,在漂烫过程中热水使一部分酚类物质降解,还有一部分浸出至漂烫液。然而IRSBD对怀山药TPC的影响更加显著($P<0.05$),它取决于干燥温度和干燥时间,是由酶促氧化和高温分解共同作用下的结果^[30]。SRTD处理的怀山药块TPC最高(85.25 mg GAE/100 g DW),40℃组、50℃组和SFTD样品TPC没有显著差异($P>0.05$),然而其TPC保留率均高于60℃组、70℃组干燥样品。

相比于新鲜怀山药,漂烫后的怀山药块 L^* 值虽略微升高,但 a^* 值和 b^* 值显著降低($P<0.05$)。

漂烫不仅可以改善色泽,而且可以使怀山药块含有的多酚氧化酶部分失活,降低IRSBD过程中酶促褐变对色泽的影响。与漂烫后的怀山药相比,IRSBD干燥样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值都有所升高。干燥去除山药块水分,降低透明度,使其逐渐显现出淀粉的白色。 L^* 值越高,表明干燥样发生的褐变越少^[31]。在恒温干燥条件下,样品的 L^* 值随干燥温度升高而升高,且在70℃干燥条件下具有最高的亮度, b^* 值也最高;而50℃干燥的山药块具有最低的 L^* 值和 b^* 值。IRSBD温度越高,干燥时间越短,怀山药块中的酚类物质受空气中氧气影响发生氧化褐变反应时间就越短,而相应的也会增加美拉德反应的强度,干燥山药块的色泽是酶促褐变和非酶褐变共同作用的结果。由表可知,60℃组、70℃组、SRTD和SFTD干燥条件下的山药块能获得较好的色泽。

表5 不同工艺条件下IRSBD怀山药的总酚含量和色泽参数

Table 5 Total phenolic content and color parameters of Chinese yams in IRSBD under different process conditions

样品	总酚含量/(mg GAE/100 g DW)	色泽参数			
		L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜山药	214.33 ± 3.56 ^a	80.93 ± 0.03 ^d	-1.69 ± 0.03 ^e	10.05 ± 0.04 ^a	—
漂烫	176.00 ± 5.33 ^b	81.78 ± 0.15 ^e	-2.25 ± 0.15 ^f	7.6 ± 0.23 ^e	1.23 ± 0.65 ^d
40℃	78.49 ± 3.56 ^{cd}	92.96 ± 0.27 ^e	-0.78 ± 0.01 ^e	7.95 ± 0.28 ^e	12.07 ± 0.26 ^e
50℃	79.14 ± 2.02 ^{cd}	94.52 ± 0.19 ^b	-0.43 ± 0.02 ^a	8.93 ± 0.13 ^b	13.68 ± 0.19 ^b
60℃	62.73 ± 2.68 ^f	95.24 ± 0.26 ^{ab}	-0.91 ± 0.09 ^{cd}	8.64 ± 0.34 ^b	14.36 ± 0.26 ^a
70℃	67.01 ± 3.00 ^{ef}	95.48 ± 0.17 ^a	-0.6 ± 0.09 ^b	8.95 ± 0.29 ^b	14.63 ± 0.15 ^a
SRTD	85.25 ± 7.41 ^c	95.15 ± 0.15 ^{ab}	-1 ± 0.09 ^d	8.64 ± 0.12 ^b	14.26 ± 0.15 ^{ab}
SFTD	74.35 ± 2.09 ^{bc}	95.29 ± 0.06 ^{ab}	-0.79 ± 0.06 ^c	8.93 ± 0.32 ^b	14.43 ± 0.06 ^a

注:不同肩标字母代表差异显著($P<0.05$),下同。

新鲜山药经漂烫后, ΔE 值较小, 但 IRSBD 对漂烫山药的 ΔE 值影响显著 ($P < 0.05$)。在恒温干燥条件下, IRSBD 干燥样品的 ΔE 值随温度升高而逐渐变大。60 °C 组、70 °C 组、SRTD 和 SFTD 干燥条件下的山药块 ΔE 值较大。 ΔE 值越大, 表明干燥样品与新鲜怀山药块色泽差异较大, 同时也发现, ΔE 值较大的样品组, L^* 值均较高, 高 L^* 值表征山药具有高亮度。

2.5.2 复水、皱缩率及质构特性 复水能力是评价干燥产品品质的重要指标之一, 它能够反映干燥对产品结构及成分变化的影响程度^[32]。图 5 呈现了 IRSBD 不同工艺条件下样品的复水曲线。由图可知, 干燥样品复水至 60 min 时, 山药块的复水速率由高到低依次为: SRTD > 70 °C > 60 °C > 40 °C > SFTD > 50 °C, 此时, 山药块的复水速率与皱缩率成反比关系, 这与山药块的孔道大小和数目有关^[33]。由表 5 可知, 达到复水平衡时, 40 °C、SFTD 和 60 °C 干燥样品的 RR 值较高, 其次是 SRTD 和 70 °C 干燥的样品, 50 °C 干燥样品 RR 值最低。造成 50 °C 干燥样品 RR 值最低的原因可能是其极高的皱缩率, 内部组织结构发生较大改变, 细胞和孔道结构被严重破坏, 从而导致复水能力变差。

表 6 为 IRSBD 不同温度条件下怀山药的质构特性和皱缩率。由表可知, IRSBD 干燥样品的硬度和皱缩率变化趋势一致。皱缩使组织结构致密, 提高了怀山药的硬度^[34]。SRTD 样品的硬度和皱缩率最低, 而 SFTD 的硬度和皱缩率最高。在恒温干

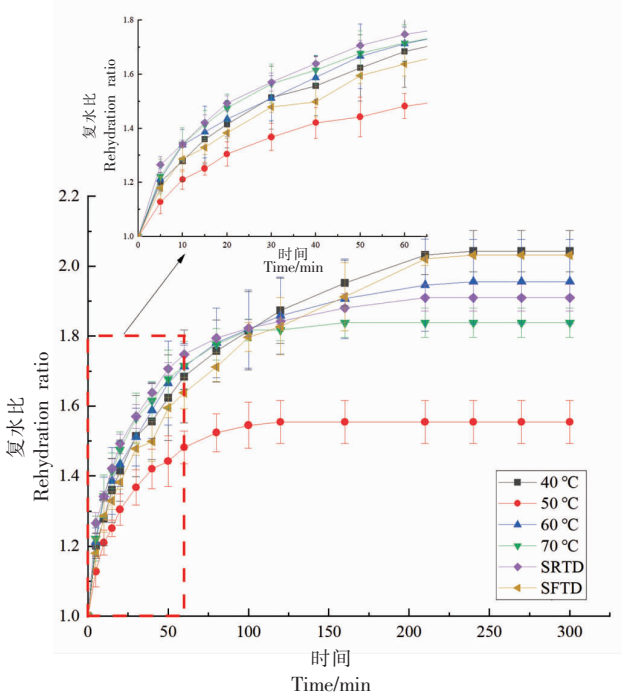


图 5 不同工艺条件下 IRSBD 怀山药的复水曲线

Fig.5 Rehydration curve of Chinese yams in IRSBD under different process conditions

燥条件下, 干燥样品的皱缩率没有显著差异 ($P > 0.05$), 60 °C 和 70 °C 干燥样品的硬度要略低于 40 °C 和 50 °C 的样品。由力峰的数量表征的样品脆度结果来看, 各组干燥样品无显著性差异 ($P > 0.05$); 由第一力峰的斜率表征的样品脆度来看, 阶段变温干燥样品的脆度较高, 而恒温干燥样品的脆度较低。

表 6 不同工艺条件下 IRSBD 怀山药的质构特性和皱缩率

Table 6 Texture properties and shrinkage ratio of Chinese yams in IRSBD under different process conditions

样品	复水比	皱缩率/%	质构特性		
			最大力/N	第一力峰的斜率/(N/mm)	力峰的数量
40 °C	2.04 ± 0.06 ^a	75.87 ± 2.14 ^{ab}	44.08 ± 4.10 ^{ab}	26.66 ± 2.95 ^c	3.33 ± 2.08 ^a
50 °C	1.55 ± 0.06 ^d	76.25 ± 3.88 ^{ab}	51.09 ± 11.32 ^{ab}	27.91 ± 4.45 ^{bc}	5.00 ± 1.00 ^a
60 °C	1.96 ± 0.12 ^{abc}	75.68 ± 3.47 ^{ab}	37.54 ± 7.17 ^{bc}	28.00 ± 13.23 ^{bc}	3.67 ± 1.15 ^a
70 °C	1.84 ± 0.04 ^c	74.61 ± 4.49 ^{ab}	34.78 ± 9.32 ^{bc}	25.97 ± 15.74 ^c	7.00 ± 4.36 ^a
SRTD	1.91 ± 0.04 ^{bc}	74.30 ± 3.96 ^b	24.94 ± 6.05 ^c	45.53 ± 2.45 ^{ab}	7.33 ± 0.58 ^a
SFTD	2.03 ^{ab}	78.76 ± 4.07 ^a	61.18 ± 11.96 ^a	50.93 ± 4.79 ^a	4.67 ± 1.53 ^a

2.6 微观结构

IRSBD 不同温度条件下怀山药的扫描电镜图如图 6 所示。结果表明, IRSBD 对怀山药的组织结

构影响显著。由图可知, 样品皱缩严重, 细胞结构受到破坏, 细胞内部被紧密排列的淀粉颗粒填充, 微孔数目极少。这种结构不仅不利于干燥时物料

内部水分的迁移,而且对于干燥样品的复水和硬度也产生不利影响。造成干燥山药块表面微孔道较少的原因主要是:1)山药块在喷动床高速气流的作用下不停的做循环运动,在整个干燥过程中不停摩擦、碰撞,使山药块外部形态发生较大改变,

内部的微管道坍塌、收缩^[35];2)在干燥过程中,多糖类、黏蛋白和脂类会随着水分一起往外迁移,脱水后在山药块表面形成紧密的复合物,堵塞孔隙结构^[25]。

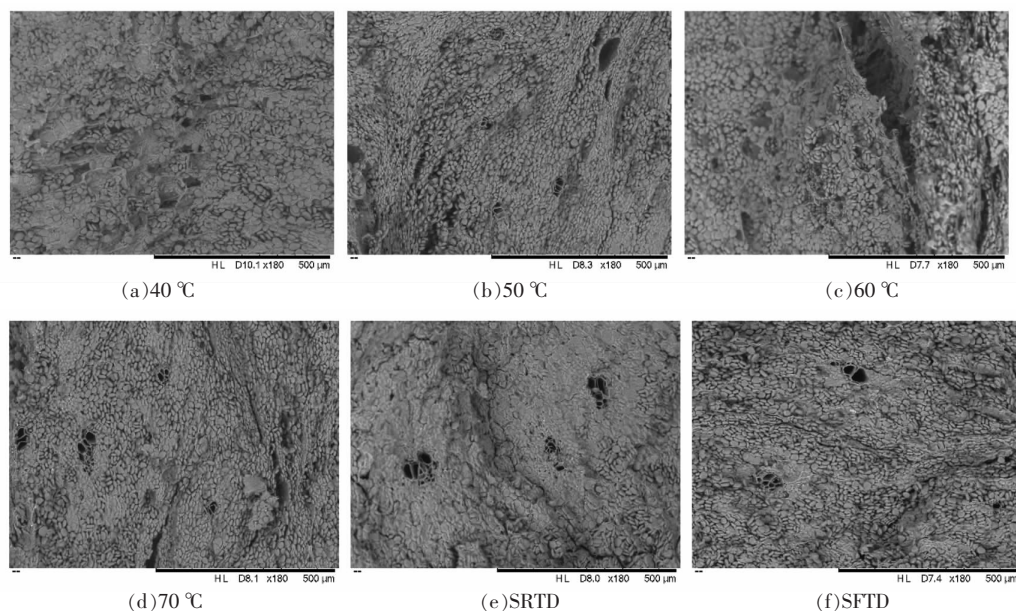


图6 不同工艺条件下 IRSBD 怀山药的微观结构图

Fig.6 Microstructure of Chinese yams dried by IRSBD under different process conditions

3 结论

本文研究了不同工艺条件下 IRSBD 怀山药的干燥特性、均匀性、能耗,以及总酚含量、色泽、复水、皱缩率、质构等品质特性,并用干燥动力学模型对 MR 曲线进行拟合。结果表明,Midilli 模型能够很好的描述怀山药 IRSBD 动力学,且对所有干燥条件下的试验数据的拟合程度较高。提高恒温干燥温度可显著降低干燥时间和能耗;阶段变温干燥时间较长,与恒温干燥相比,SRTD 样品在总酚含量、硬度方面有显著优势,在温度和 ΔE 方面表现出最好的干燥均匀性,同时能够保持较低的能耗和良好的色泽;SFTD 能够改善样品的脆度,使样品获得良好的色泽和复水比。干燥后的怀山药表面微孔道较少,细胞结构受到严重破坏,细胞内部被紧密排列的淀粉颗粒填充。经综合分析得出:SRTD 是更为理想的 IRSBD 怀山药方法。该研究为怀山药 IRSBD 工艺优化提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 年版一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 17. National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China; Volume 1, 2020 edition[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 17.
- [2] 龚凌霄, 池静雯, 王静, 等. 山药中主要功能性成分及其作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 312-319. GONG L X, CHI J W, WANG J, et al. Research progress on main functional component and action mechanism of *Dioscorea opposita* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 312-319.
- [3] PADHAN B, PANDA D. Potential of neglected and underutilized yams (Chinese yams spp.) for improving nutritional security and health benefits[J]. Frontiers in Pharmacology, 2020, 11: 496.
- [4] 刘可越, 舒长兴, 石向群, 等. 不同产地山药主要生

- 化成分对比分析[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(10): 2108–2110.
- LIU K Y, SHU C X, SHI X Q, et al. Analysis of biochemical ingredients in rhizoma dioscoreae from different producing areas[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(10): 2108–2110.
- [5] CHEN Y F, ZHU Q, WU S J. Preparation of oligosaccharides from Chinese yam and their antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1107–1110.
- [6] HIKINO H, KONNO C, TAKAHASHI M, et al. Isolation and hypoglycemic activity of dioscorans A, B, C, D, E, and F; glycans of *Dioscorea japonica* rhizophors[J]. Planta Medica, 1986, 52(3): 168–171.
- [7] IWU M, OKUNJI C, AKAH P, et al. Dioscoretine: The hypoglycemic principle of *Dioscorea dumetorum* [J]. Planta medica, 1990, 56(3): 119–120.
- [8] 潘景芝, 孟庆龙, 崔文玉, 等. 山药功能性成分及药理作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 420–428.
- PAN J Z, MENG Q L, CUI W Y, et al. Advances in studies on functional components and pharmacological effects of *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 420–428.
- [9] LI Y, JI S Y, XU T, et al. Chinese yam (*Dioscorea*): Nutritional value, beneficial effects, and food and pharmaceutical applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 29–40.
- [10] ZOU J, XU M J, ZOU Y F, et al. Physicochemical properties and microstructure of Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) flour[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106448.
- [11] WANG H Y, LIU D, YU H M, et al. Optimization of microwave coupled hot air drying for Chinese yam using response surface methodology [J]. Processes, 2019, 7(10): 745.
- [12] XIAO H W, YAO X D, LIN H, et al. Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices[J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35(3): 370–390.
- [13] DEGHAN - MANSHADI A, PEIGHAMBARDOST S H, AZADMARD - DAMIRCHI S, et al. Effect of infrared - assisted spouted bed drying of flaxseed on the quality characteristics of its oil extracted by different methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(1): 74–80.
- [14] XU Y M, LIU W C, LI L L, et al. Dynamic changes of non-volatile compounds and evaluation on umami during infrared assisted spouted bed drying of shiitake mushrooms[J]. Food Control, 2022, 142: 109245.
- [15] ZHU K Y, LI L L, REN G Y, et al. Efficient production of dried whole peanut fruits based on infrared assisted spouted bed drying[J]. Foods, 2021, 10(10): 2383.
- [16] 周四晴. 基于红外干燥的益生菌浸渍怀山药休闲食品制备技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
- ZHOU S Q. Study on preparation technology of probiotic impregnated Chinese yam (*Dioscorea spp.*) leisure food based on infrared drying[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [17] 余祖艳, 任广跃, 许韩山, 等. 咖啡豆红外喷动床干燥对其粉末物性品质、干燥能耗及挥发性成分的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–11 (2023–02–01) [2023–05–05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034145>.
- YU Z Y, REN G Y, XU H S, et al. Effects of infrared-assisted spouted bed drying on physical properties, drying energy consumption, and volatile components of coffee beans powder [J/OL]. Food and Fermentation Industries: 1–11 (2023–02–01) [2023–05–05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034145>.
- [18] HNIN K K, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review[J]. Drying Technology, 2019, 37(12): 1465–1480.
- [19] 段续, 徐一铭, 任广跃, 等. 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 293–302.
- DUAN X, XU Y M, REN G Y, et al. Optimization of the drying process parameters for *Lentinus edodes* in segment variable temperature infrared assisted spouted bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 293–302.
- [20] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式下带壳鲜花生质构、营养成分及能耗的表征[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 177–188.

- ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Characterization of texture, nutrients and energy consumption of fresh flowers with shell under different drying methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 177-188.
- [21] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-245.
- DUAN X, ZHANG M, REN G Y, et al. Drying models and quality changes of rose subjected to infrared assisted spouted bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 238-245.
- [22] PU Y Y, SUN D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution [J]. Biosystems Engineering, 2017, 156: 108-119.
- [23] 严启梅. 杏鲍菇真空微波联合气流膨化干燥研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- YAN Q M. Study of combined vacuum microwave and air puffing drying *Pleurotus eryngii*[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.
- [24] 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 L L. Study on energy saving and quality loss-reduction of pulse-spouting combined with microwave [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [25] ROJAS M L, AUGUSTO P E D. Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 49: 65-75.
- [26] LI L L, CHEN J L, ZHOU S Q, et al. Quality evaluation of probiotics enriched Chinese yam snacks produced using infrared - assisted spouted bed drying [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15358.
- [27] WANG X L, FENG Y B, ZHOU C S, et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*) [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 432-440.
- [28] 马立, 段续, 任广跃, 等. 红外-喷动床联合干燥设备研制与分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 119-124, 129.
- MA L, DUAN X, REN G Y, et al. Development and analysis of infrared-spouted bed combined drying equipment[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 119-124, 129.
- [29] 孟月丽, 张庆岭. 铁棍山药皮中多酚类化合物体外抗氧化作用研究[J]. 中医学报, 2016, 31(5): 707-710.
- MENG Y L, ZHANG Q L. Anti-oxidation effect of polyphenolic compounds in Chinese yam peel *in vitro* [J]. Acta Chinese Medicine, 2016, 31(5): 707-710.
- [30] LI L L, PAN H, CHEN J L, et al. Infrared - assisted spouted bed drying of Chinese yam cubes: Effect of constant and variable temperature drying processes on drying behavior, uniformity, and quality attributes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(6): 2815-2823.
- [31] SONG X Y, HU H, ZHANG B L. Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17(3): 290-296.
- [32] 王玉川. 莴苣颗粒负压微波高效节能均匀干燥机理及工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- WANG Y C. Studies on mechanism and technology of negative pressure drying assisted by microwave for stem lettuce cubes with efficiency, energy -saving and uniformity[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [33] ZHAO Y Y, YI J Y, BI J F, et al. Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices [J]. Drying Technology, 2019, 37(3): 352-362.
- [34] 郭嘉, 刘春菊, 任晗慈, 等. 不同联合干燥方法对山药片质地结构及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22): 213-217.
- GUO J, LIU C J, REN H C, et al. Effects of different combined drying methods on texture structure and quality of yam slices [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(22): 213-217.
- [35] 颜伟强. 颗粒状切割块茎类蔬菜微波喷动均匀干燥特性及模型研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- YAN W Q. Studies on drying uniformity and model of microwave spouted bed dried cutting tuber vegetables pieces[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.

Studies on Drying Kinetics, Uniformity and Quality Characteristics of Chinese Yam Dried by Infrared-Assisted Spouted Bed at Constant and Variable Temperature

Pan Hong¹, Li Linlin^{1,2}, Ren Guangyue^{1,2}, Duan Xu^{1,2*}

¹College of Food and Biological Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan

²Henan Engineering Technology Research Center for Drying Technology and Equipment of Agricultural Products, Luoyang 471023, Henan)

Abstract In this study, infrared-assisted spouted bed drying (IRSBD) of Chinese yam was carried out using constant temperature drying (40, 50, 60 °C and 70 °C) and variable temperature drying (staged rising temperature and staged falling temperature) processes to investigate the effects on drying kinetics, uniformity, and quality properties (texture, rehydration, total phenolic content, microstructure, and shrinkage). The mathematical modeling results of the Chinese yam IRSBD drying curve showed that the Midilli model had the best fit, with the maximum R^2 value (0.99989) and the minimum RMSE and χ^2 values (0.00319 and 1.69872×10^{-5} , respectively), indicating that it was most suitable for describing the IRSBD kinetics of Chinese yam. In the comparative analysis of different drying processes, it was found that increasing the drying temperature under constant-temperature drying conditions was beneficial for shortening the drying time and reducing energy consumption. Staged rising temperature drying had energy consumption only slightly higher than that of constant-temperature drying at 70 °C, but it exhibited the best drying uniformity, the highest total phenolic content [(85.25±7.41) mg GAE/100 g DW], and the lowest shrinkage and hardness [(74.3±3.96)% and (24.95±7.41) N], respectively, as well as a desirable color. The staged falling drying process produced samples with higher equilibrium rehydration ratio and crispness, but it did not show significant advantages over the staged rising temperature process in terms of drying time, energy consumption, uniformity, hardness, shrinkage ratio, and total phenolic content. Therefore, it can be concluded that staged rising temperature drying is a more ideal drying process for Chinese yam using IRSBD. This study provides data reference and theoretical support for the application of IRSBD technology in agricultural product processing and industrial production.

Keywords Chinese yams; infrared-assisted spouted bed drying; variable temperature; drying quality; drying uniformity