

香葱催化式红外干燥特性及品质研究

赵兴, 吴本刚, 马海乐, 刘潇

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 该文研究了 60、70、80、90 °C 四个不同温度下催化式红外干燥香葱的干燥特性, 并对产品品质进行了分析。研究发现: 干燥温度越高, 干燥脱水速率越快; 干燥过程中香葱在不同干燥温度下干燥速率呈现不同的变化趋势。选取典型的干燥模型对香葱红外干燥动力学进行了模拟, 研究发现 Page 模型能更好的表征催化式红外干燥香葱的干燥过程。其次, 研究了不同干燥温度条件下, 香葱干燥后的颜色变化和湿基含水率的关系, 研究发现: 当湿基含水率小于 70% 时, 色差 a^* 随湿基含水率的降低而增大。此外, 对不同干燥温度下香葱干燥后的 Vc 含量和复水比进行了研究, 结果发现在 70 °C 下干燥产品的色泽变化小, Vc 含量高, 复水比最大。结合干燥时间和品质综合考量, 70 °C 为香葱催化式红外干燥的最佳干燥温度。

关键词: 红外干燥; 干燥特性; 香葱; 色泽; 复水比

文章编号: 1673-9078(2018)09-182-189

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.9.026

Drying Characteristics and Quality Attributes of Chinese Chives by Catalyzed Infrared Drying

ZHAO Xing, WU Ben-gang, MA Hai-le, LIU Xiao

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In this work, the drying characteristics and product quality of Chinese chives were investigated under different temperatures (60, 70, 80, 90 °C) by using catalytic infrared drying technology. The drying rate increased with the increase of temperature. The trends in drying rate of Chinese chives under different drying temperatures were different during the drying process. According to the statistical results, the catalytic infrared drying of Chinese chives was properly described by Page among three mathematical models that were used to fit the experimental data. The relationship between the color and the moisture content of Chinese chives was studied under different drying temperatures. The result showed that, when the moisture content was less than 70%, the color (a^*) increased with the decrease of the moisture content. In addition, the Vc content and rehydration ratio of dried Chinese chives under different drying temperatures were studied. The result demonstrated that no significant difference in color, the highest values in Vc content and rehydration ratio were found at 70 °C. Considering the combination of drying time and quality, 70 °C is the optimum drying temperature for the catalytic infrared drying of chives.

Key words: infrared drying; drying characteristics; chives; color; rehydration ratio

香葱, 百合科、葱属植物, 矩圆状卵形, 叶为中空圆筒状, 向顶端渐尖, 深绿色, 质地柔嫩, 味清香。香葱具有较高的营养价值和功效, 如, 香葱内的蒜辣素能刺激机体消化液的分泌, 同时可抑制癌细胞的生长^[1], 而其所含的大蒜素则具有杀菌、消毒的作用^[2]。脱水干燥是香葱加工的一个重要方式, 香葱干

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20150500); 江苏大学高层次人才科研启动基金项目 (15JUG070); 江苏省重点国别及机构产业技术合作项目 (BZ2017034); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (2017YFE0105300)

作者简介: 赵兴 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品红外加工
通讯作者: 马海乐 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品物理加工技术

干燥脱水后主要用于调味品行业。脱水香葱也是我国重要的创汇脱水蔬菜之一^[3]。

目前传统的香葱干燥技术为热风干燥, 此方法由于成本低, 易操作的特点^[4], 广泛应用于脱水蔬菜生产企业中。热风干燥以热空气为干燥介质, 以自然或强制对流循环的方式与物料进行湿热交换, 物料表面上的水分通过表面的气孔向干燥介质扩散, 由于物料表面汽化, 使物料内部和表面之间产生水分梯度差, 物料内部的水分因此以汽态或液态的形式向表面迁移。然而, 热风干燥存在干燥时间长、能耗高, 品质低等问题^[5], 急需一种新的高效干燥技术。

红外辐射加热技术是一种新的食品加工技术, 被广泛应用于农产品的漂烫^[6]和干燥领域^[7]。Baysal^[8]等研究了微波和红外干燥对胡萝卜和大蒜品质的影响,

通过对比红外干燥对色泽和复水性的影响,得出红外干燥产品的复水性要好。Afzal 等^[9]人研究远红外联合对流干燥大麦,结论较单独对流干燥,远红外联合缩短 60% 的干燥时间。XIE L^[10]研究了远红外辐射加热辅助脉冲真空干燥(FIR-PVD)枸杞,干燥时间短,干枸杞的颜色参数与新鲜浆果的颜色参数相似。王洪彩^[11]对比了热风和中短波红外两种方式干燥香菇的品质,得出中短波红外干燥的香菇的感官品质和化学品质均优于热风干燥后的香菇。

催化式红外(CIR)设备是由天然气或液化气在催化剂的作用下与氧气发生的氧化反应产生,波长在远红外波长之间,具有升温速度快、干燥速率高、能耗低^[5]等优点。目前关于香葱红外干燥特性和品质的研究鲜有报道,因此,本文将催化式红外干燥技术应用于香葱的干燥,探讨不同温度下催化式红外干燥香葱的干燥特性及品质,为香葱的催化式红外干燥特性和品质研究提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

香葱(水分含量约 91%),从当地农贸市场同一批购进,储藏在冰箱中(温度 4 ± 1 °C)。试验前,将香葱从冷藏室中取出,放至室温待用。选择颜色鲜艳,结构规整,无机械损伤的部分,清洗,切成长度为 1 cm 的块状。

1.2 主要仪器设备

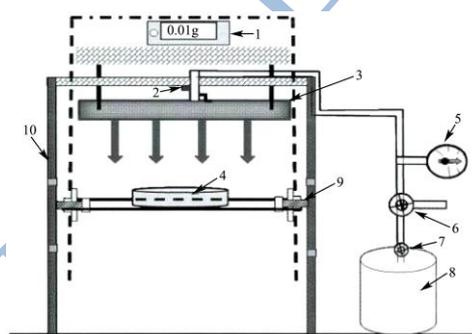


图1 催化式红外设备

Fig.1 CIR (catalytic infrared) dehydrator

注: 1.称量天平; 2.点火开关; 3.催化式红外发生器; 4.金属样品网; 5.压力读数表; 6.气体调节阀; 7.气体释放开关; 8.液化气罐; 9.距离调整螺钉; 10.处理室。

BAS2202S 天平, Sartorius 公司(哥廷根, 德国); TM350+手持式红外测温仪, Tecmen 电子有限公司(香港, 中国); HH-S2 数显恒温水浴锅, 金坛市医疗仪器厂(金坛, 江苏, 中国); 色差仪 NH310 深圳三恩驰科

技术有限公司(深圳, 中国); 催化式红外干燥机, 镇江美博红外科技有限公司(镇江, 江苏, 中国)。

本研究用的催化式红外设备由催化式红外发生器(30×60 cm)和处理室(100×100×60 cm)组成。使用前先将催化式红外发生器预热 15 min, 然后通过气体控制阀通入液化气后点火, 试验过程通气阀气压控制在 1.5 kPa, 工作时催化式红外发生器的表面温度可达到 (395 ± 5) °C。

1.3 实验方法与测定指标

1.3.1 试验设计

前期通过预实验调整红外发生器的辐照距离, 用手持红外测温仪测定香葱表面温度, 选取红外的辐照距离分别为 25 cm、15 cm、8 cm、4 cm, 对应的温度分别为 60 °C、70 °C、80 °C、90 °C。取 30 g 切好的香葱单层平铺在托盘上, 打开催化式红外干燥设备, 当红外设备达到预设温度并且稳定后, 将托盘放入设备中, 在不同的温度条件下进行干燥。每隔一分钟, 记录干燥过程中香葱的重量, 当香葱湿基含水率达到 8% 时干燥结束。每次实验重复 3 次, 取平均值。为保证实验过程中温度恒定, 通过调整托盘和红外发生器的距离来实现。

1.3.2 温度和水分测定

干燥过程中, 使用手持式红外测温仪测定香葱的表面温度, 多次测量, 取平均值。

香葱的初始水分含量测定参照 GB/T 5497-1985 用 105 °C 恒重法测得。

1.3.3 颜色测定



图2 NH310 色差仪

Fig.2 NH310 colorimeter

实验中使用色差仪 NH310 直接测量法检测香葱的表面颜色。检测时把托盘内的香葱等分为三部分, 将色差仪的光孔垂直压在香葱表面上, 轻压, 读数。取每个部分的色差平均值记为香葱表面的色值, 并用数值 L^* 、 a^* 和 b^* 值表示。其中 L^* 值表示亮度, a^* 值表示红色或绿色值, 而 b^* 值表示蓝色或黄色值。 a^* 正

值越大表示颜色越接近红色, a*负值越大, 颜色越接近绿色; b*正值越大, 颜色越接近黄色; b*负值越大, 颜色越接近蓝色。下标 0 代表新鲜香葱的颜色值。颜色变化值ΔE 通过公式(1)计算所得, ΔE 值越大, 表示干燥产品的颜色变化越大^[12]。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

式中: L₀, a₀, b₀-新鲜对照组值; L*, a*, b*-实验检测值。

1.3.4 复水性测定

将实验结束后的香葱干制品放入室温 25 °C^[13]水中进行复水性试验, 每隔 20 min 称重一次, 测定其重量, 直至达到平衡为止。复水比的计算公式(2)如下:

$$\text{复水比} = \frac{\text{复水后重量}}{\text{复水前重量}} \quad (2)$$

1.3.5 物料水分比和干燥速率^[14]

物料水分比的计算公式(3)为:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (3)$$

式中 MR 为水分含量/(g 水分重量/g 干物质重量), m_t为物料在 t 时刻的含水量/(g/g)。m₀、m_e分别为物料的初始、平衡含水量/(g/g), 由于 m_e相对于 m_t和 m₀很小, 通常在工程应用中忽略不计, 因此, 物料水分比可采用简化式(4)如下所示:

$$MR = \frac{m_t}{m_0} \quad (4)$$

干燥速率计算公式(5)如下:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

式中: t₁, t₂为干燥时间, M_{t1}, M_{t2}分别为 t₁、t₂时间时的水分比。

1.3.6 干燥动力学模型的建立

前人已经对干燥过程进行了研究, 并总结出了一些常用的经验、半经验模型来描述物料干燥过程中的情况。本研究选择三种常见的干燥模型(表 1)来对催化式红外干燥香葱的干燥曲线进行模拟。

表 1 果蔬薄层干燥的数学模型

Table 1 Thin layer drying models for vegetables and fruits

模型名称	模型方程
Lewis	MR=exp(-kt) ^[15]
Page	MR=exp(-kt ⁿ) ^[16]
Henderson and Pabis	MR=a exp(-kt) ^[17]

模拟结果用决定系数 (R²)、均方根误差 (root-mean-square error, RMSE)、误差平方和 (error sum of square, SSE) 和离差平方和 (χ²) 4 个参数对

模型拟合结果进行评价。决定系数 (R²) 越大、RMSE、SSE 和 χ² 越小, 则拟合度越好。四个值计算公式(6~9)如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (MR_{\text{exp}i} - MR_{\text{pre}i})^2}{\sum_i^n (MR_{\text{exp}i} - MR_{\text{exp}i})^2} \quad (6)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre}i} - MR_{\text{exp}i})^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre}i} - MR_{\text{exp}i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre}i} - MR_{\text{exp}i})^2}{N - n} \quad (9)$$

式中, MR_{pre,i}为模型预测水分比, MR_{exp,i}为试验测得水分比, MR_{exp}为试验测得水分比的平均值, N 为试验测得数据组数, n 是干燥常数的数目。

数据处理和分析采用 SPSS 17.0 统计分析软件。

1.3.7 水分有效扩散系数和活化能

水分有效扩散系数通过水分比的对数值与处理时间的关系式(10)来计算, 干燥活化能值 E_a(11)根据水分有效扩散系数 D_{eff}^[18]计算。

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{m}{m_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{H^2} t\right) \quad (10)$$

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

式中, D₀为系数, R 表示气体常数[kJ/(mol K)], T 是香葱处理温度的绝对温度值(K)。

1.3.8 维生素 C 含量

利用维生素 C 对紫外产生吸收和对碱不稳定的特点, 采用文献^[19]中的方法检测香葱的维生素 C 含量。

1.3.9 数据统计分析

采用 17.0 版 SPSS 数据统计分析软件对实验数据进行显著性分析, 采用决定系数 (R²)、均方根误差 (root-mean-square error, RMSE)、误差平方和 (error sum of square, SSE) 和离差平方和 (χ²) 4 个参数作为拟合度评价指标, 决定系数 R²越接近 1, RMSE、SSE、χ²数值越小, 表示模型拟合度越好; 图表绘制用 Excel 2010 完成。

2 结果与分析

2.1 香葱催香催化式红外干燥特性

由图 3 可知, 香葱的含水量随着干燥时间的延长而减少, 温度越高干燥时间越短, 水分降低越快。当干燥温度分别在 60、70、80、90 °C 条件下时, 所需的干燥时间分别为 30、20、17、10 min, 其中 70、80 °C 的干燥时间较为接近, MR 的趋势变化也相近。代小

梅^[20]研究了热风在 60、70、80、90 °C 条件下干燥香葱的干燥特性,干燥时间分别是 5.5 h、4 h、3.5 h、3 h。相比热风干燥,催化式红外干燥要节省 90% 以上的时间。

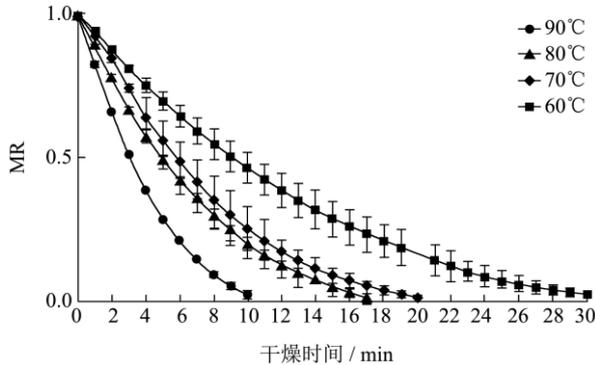


图3 不同温度条件下香葱红外干燥特性曲线

Fig.3 Drying curves of Chinese chives in infrared radiation drying at different temperatures

2.2 香葱催化式红外干燥干燥速率

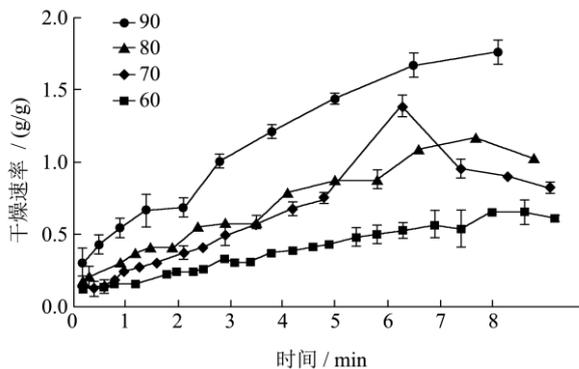


图4 不同温度条件下香葱红外干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curves of Chinese chives in infrared radiation drying at different temperatures

由图4可知,红外干燥过程中香葱在不同温度条件下干燥速率不同,90 °C条件下属于降速干燥过程,随着干基含水率的减小而降低;在60、70、80 °C条件下随干基含水率的降低呈先升后降的趋势。在干基含水率低于0.8 g/g时,70 °C的干燥速率低于60 °C,这是因为温度越高,干燥速率越快,香葱表面结壳变硬,阻碍了水分的扩散。陈凯^[21]在研究红外干燥枸杞时,也出现了类似迹象。在干基含水率为5.2~7.0 g/g时,70 °C的干燥速率高于80 °C,这和红外辐射距离对香葱表面结构影响有关。张丽丽^[22]研究了红外辐射距离对胡萝卜片表观密度和孔隙率的关系,辐射距离越近,表观密度越大,孔隙率越小,不利于水分的扩散。本实验采用的温度是通过调整辐射距离来控制,干燥前期,80 °C因为辐射距离近,空隙小,表观密度大,不利于水分的扩散,出现干燥速率低于70 °C的现象。张

磊^[23]研究了不同红外辐照距离干燥紫甘蓝和干基含水率的关系,也出现类似迹象。

表2 催化式红外干燥香葱的干燥时间和最大干燥速率

Table 2 Drying time and max drying rate of Chinese chives

processed under catalytic infrared		
红外干燥温度	红外干燥时间	最大干燥速率
/°C	/min	/[g/(g min)]
60	30	0.65
70	20	0.95
80	18	1.16
90	10	1.76

2.3 香葱干燥过程中的色泽变化和温度的关系

干燥过程中香葱表面的色泽变化是评价产品品质的一个重要指标,表3列出了人的视觉感官和色差值之间的关系。

表3 色差与观察感觉的关系^[24]

Table 3 Relationship between ΔE and people's feeling

色差 (ΔE)	感觉差异
0~0.5	极小差异
0.5~1.5	稍有差异
1.5~3.0	感觉到差异
3.0~6.0	较显著差异
6.0~12.0	很明显的差异
>12.0	不同颜色

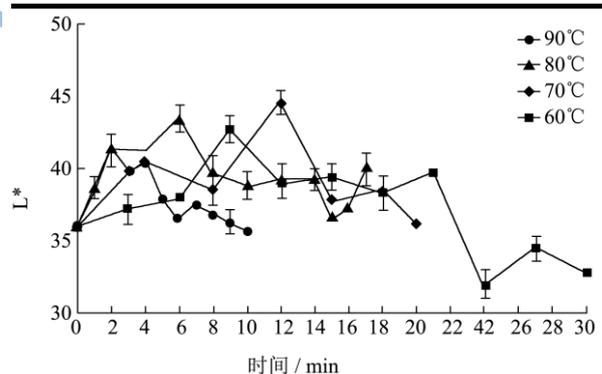


图5 不同温度条件下香葱表面颜色变化值L*

Fig.5 Change of surface color (L^*) of Chinese chives under different temperature conditions

由图5可知,在红外干燥香葱的过程中,亮度变化值 L^* 呈先升后降的趋势,其中在60、90 °C干燥后香葱的 L^* 值低于初始值。图6中在70、80、90 °C条件下, b^* 值也呈先升后降的趋势;60 °C条件下 b^* 值随干燥时间的延长而减小。图7中 a^* 值在60、80、90 °C条件下呈先降后升的趋势,70 °C条件下 a^* 值在初始值附近波动,变化小。由图8知,不同温度条件下 ΔE 都经历了先升后降再上升的过程,Wu^[25]研究了催化式

红外杀青胡萝卜过程中 ΔE 的变化, 得到相似结论, 这是因为在干燥后期, 温度升高香葱表面发生炭化, L^* 值降低 a^* 值升高。60 °C温度低, 干燥时间长, 干燥后期 L^* 值、 b^* 值降低, 发生褐变反应, ΔE 值增大。

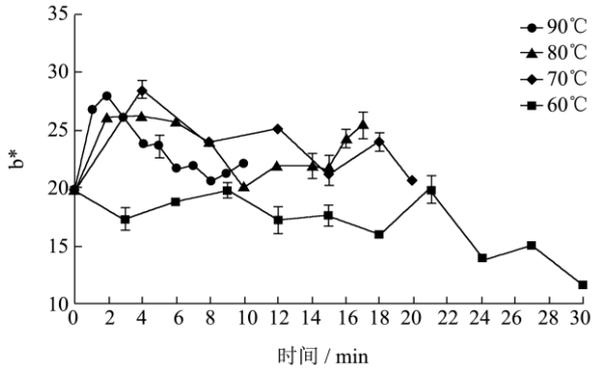


图6 不同温度条件下香葱表面颜色变化值 b^*

Fig.6 Change of surface color (b^*) of Chinese chives under different temperature conditions

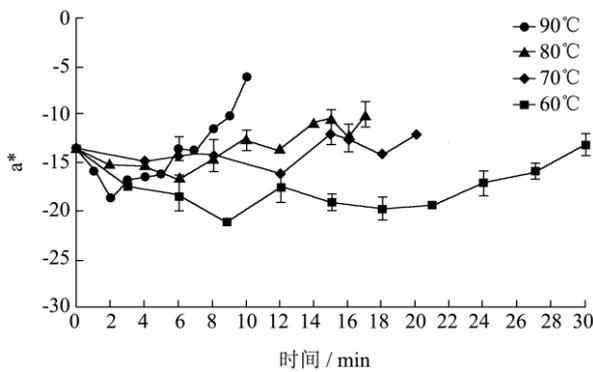


图7 不同温度条件下香葱表面颜色变化值 a^*

Fig.7 Change of surface color (a^*) of Chinese chives under different temperature conditions

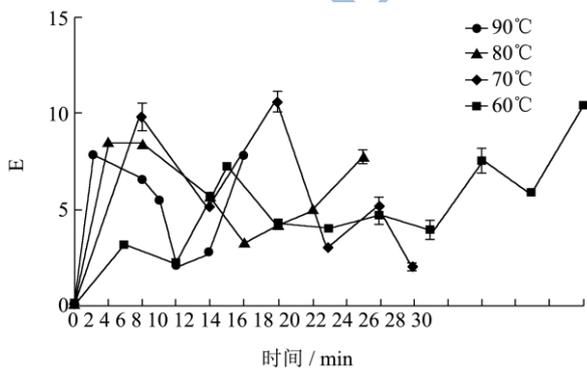


图8 不同温度条件下香葱表面颜色变化值 ΔE

Fig.8 Change of surface color (ΔE) of Chinese chives under different temperature conditions

2.4 干燥过程中色泽变化和湿基含水率的关系

由图9可知, 在60、90 °C条件下, 当湿基含水率

小于44%时, 色泽开始变暗。图10中, 在70、80、90 °C条件下, 湿基含水率为60%~70%时, a^* 值开始升高。图11中, b^* 值主要和干燥温度有关, 在70、80、90 °C条件下, 湿基含水率大于80%时, b^* 值呈先升后降的趋势, 湿基含水率为46%~68%时, b^* 值变化较小。综上可知, 在红外干燥香葱过程中, 湿基含水率和温度对 L^* 、 a^* 的数值变化关系紧密。

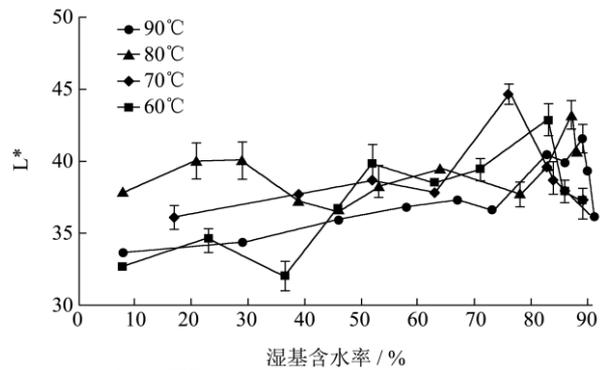


图9 颜色变化 L^* 和湿基含水量关系

Fig.9 Relationship between color change(L^*) and moisture content

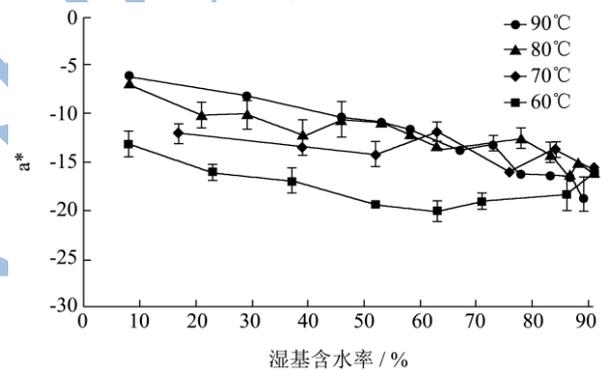


图10 颜色变化 a^* 和湿基含水量的关系

Fig.10 Relationship between color change(a^*) and moisture content

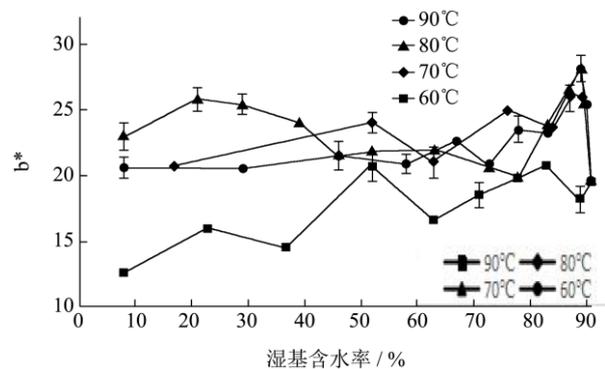


图11 颜色变化 b^* 和湿基含水量关系

Fig.11 Relationship between color change(b^*) and moisture content

2.5 建立红外干燥香葱的动力学模型

选取常用的三种不同干燥模型对香葱的红外干燥过程进行拟合, 结果如表 4 所示。

所有模型的 R^2 均 ≥ 0.9787 , SSE 均 ≤ 0.0433 , RMSE 均 ≤ 0.0465 , χ^2 均 ≤ 0.0023 , 其中 Lewis、Page、Henderson and Pabis 模型的 R^2 值最小值分别为 0.9787、0.9966、0.9883, SSE 最大值分别为 0.0433、0.0031、0.0303,

最大 RMSE 值分别为 0.0465、0.0171、0.0389, 最大 χ^2 值分别为 0.0023、0.0003、0.0017, 对比三个模型的数值, 发现 Page 模型的 R^2 , SSE、RMSE、 χ^2 值均优于另两个模型, 更能准确的描述催化式红外干燥香葱过程中的水分变化, 故选取 Page 模型来作为本实验研究结果的动力学模型。

表 4 香葱薄层干燥模型拟合结果

Table 4 Fitted results of thin-layer drying models for Chinese chives

模型	温度/°C	参数			R^2	SSE	RMSE	χ^2
		k	n	a				
Lewis	60	0.0852			0.9845	0.0407	0.0368	0.0014
	70	0.1341			0.9787	0.0433	0.0465	0.0023
	80	0.1523			0.9856	0.0243	0.0378	0.0015
	90	0.2542			0.9869	0.0145	0.0381	0.0016
Page	60	0.0492	1.2141		0.9966	0.0087	0.0171	0.0003
	70	0.0756	1.2745		0.9990	0.0025	0.0111	0.0001
	80	0.0989	1.2235		0.9982	0.0031	0.0135	0.0002
	90	0.1762	1.2351		0.9981	0.0018	0.0134	0.0002
Henderson and Pabis	60	0.0902		1.0560	0.9883	0.0303	0.0318	0.0011
	70	0.1345		1.0594	0.9883	0.0302	0.0389	0.0017
	80	0.1586		1.0398	0.9939	0.0197	0.0340	0.0013
	90	0.2622		1.0430	0.9897	0.0114	0.0338	0.0014

2.5.1 Page 模型参数的求解

为了理解红外干燥香葱过程中模型中的参数 k、n 和干燥温度的关系, 对模型中的参数 k、n 的数值进行线性分析, 得到干燥温度与参数 k、n 之间的关系式:

$$k=4 \times 10^{-3}T-0.203, n=1.228-2 \times 10^{-4}T$$

式中: k、n 为模型参数; T 为干燥温度/°C。

代入 Page 模型得到下式:

$$MR=\exp[(0.203-4 \times 10^{-3}T) \times T^{1.228-2 \times 10^{-4}T}]$$

2.5.2 Page 模型验证

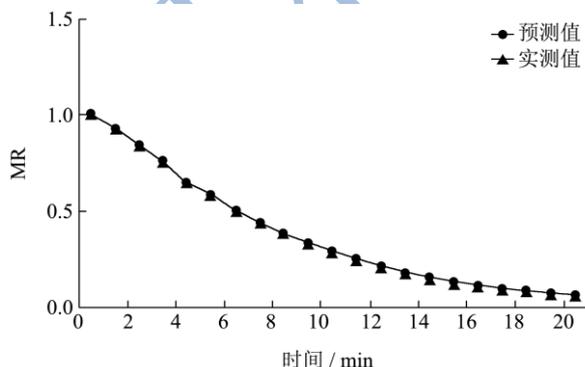


图 12 Page 模型验证实测值与预测值的比较

Fig.12 Comparison of experimental data and predicted data using Page models at selected conditions

选择催化式红外干燥温度为 70 °C 条件下进行 page 模型的验证。比较实测值与模型预测值的相关

性, 结果如图 12, 预测值与试验值相比, R^2 为 0.9995。因此, page 模型方程非常适合表达试验范围内香葱催化式红外干燥的规律。

2.6 香葱催化式红外干燥过程中水分的有效扩散系数

香葱红外干燥过程中水分有效扩散系数在 60~90 °C 内为 $3.96 \sim 10.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 食品物料干燥过程中水分的有效扩散系数^[26]在 $10^{-9} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内, 本实验结果符合标准。由实验可知, 温度越高, 水分有效扩散系数越大, 水分扩散越快, 干燥时间也越短。Celmaar^[27]在干燥葡萄副产物的研究中也得出干燥过程中水分的有效扩散系数随着温度的升高而增加的结论。

表 5 不同处理条件下香葱的有效扩散系数和活化能

Table 5 Effective moisture diffusivities and activation energies of Chinese chives processed under catalytic infrared

温度/°C	水分有效扩散系数/ $(\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$	活化能/(kJ/mol)
60	3.96 ± 0.29	
70	4.80 ± 0.13	
80	9.35 ± 0.18	33.61
90	10.7 ± 0.19	

2.7 干燥产品的维生素 C 含量与复水比

在干燥产品中,产品的复水比是评价产品口感的一个重要指标,本研究以常温下干燥产品在水中的复水性进行了研究,实验结果表明在 60、70、80、90 °C 下干燥后产品的复水比依次是 5.5、6.51、4.36、4.33,其中在 70 °C 干燥产品的复水比最好,达到 6.51。这和红外辐射距离有关,张磊^[23]研究了不同红外辐照距离干燥紫甘蓝的复水性,得出辐射距离 11 cm 时的复水性要高于辐射距离为 3 cm 和 5 cm 的复水性。

表 6 不同处理条件下香葱的复水比和维生素 C 含量

Table 6 Rehydration ratio and vitamin C content of Chinese chives processed under catalytic infrared

干燥温度/°C	复水比	Vc 含量/(mg/100 g)
60	5.5±0.10 ^a	3.33±0.05 ^a
70	6.51±0.48 ^a	4.90±0.04 ^c
80	4.36±0.36 ^c	1.52±0.03 ^b
90	4.33±0.73 ^b	1.28±0.06 ^d

维生素 C 是热敏性物质,温度越高,Vc 损失越多,剩余含量越低,表中在 60 °C 条件下 Vc 含量低于 70 °C 条件下 Vc 含量,是因为 60 °C 条件下干燥时间长,导致 Vc 损失更多。Fang^[28]研究了不同温度下热风干燥枣的品质,发现 70 °C 热风干燥后枣的 Vc 含量要高于 60 °C,认为是干燥时间的延长导致了 Vc 含量的更大损失。Wu^[25]研究了不同温度条件下催化式红外杀青胡萝卜的 Vc 保留率,杀青结束后 95 °C 条件下 Vc 保留率要高于 90 °C Vc 保留率,95 °C 杀青时间比 90 °C 少 3.5 min,与本实验结论类似。Chen^[29]的研究结果与此相反,作者认为品种和干燥时间不同可能会导致不同的结果。

3 结论

香葱在红外干燥过程中的干燥速率随着温度的增加而增大,整个过程中干燥时间在 30 min 内,最低活化能为 33.61 kJ/mol。干燥过程中色泽变化和湿基含水量、温度有关,不同湿基含水量和温度对 L, a, b 值的影响不同。综合考虑干燥后产品的 Vc 含量、色泽和复水性,选取干燥温度为 70 °C,得到的产品质量最好,Vc 含量为 4.90 mg/100 g,ΔE 值为 1.9,复水比可达 6.51。

参考文献

[1] 尤亚林,李慧,潘思轶.细香葱提取物对人胃癌细胞 SGC7901 抑制作用[J].食品科学,2017,38(3):176-181
YOU Ya-lin, LI Hui, PAN Si-yi. Inhibitory effect of chives

extract on human gastric cancer cells SGC7901 [J]. Food Science, 2017, 38(3): 176-181

[2] 何超.葱蒜类植物对辣椒疫病发生的影响[D].扬州:扬州大学,2012
HE Chao. Effects of onion and garlic plants on occurrence of pepper blight [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012

[3] 吕洁.兴化香葱香飘万里[J].食品安全导刊,2014,z2:64
LV Jie. Xinghua's chives export to the world [J]. China Food Safety Magazine, 2014, z2: 64

[4] Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N. Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying [J]. Food & Bioproducts Processing, 2011, 89(2): 116-127

[5] Gabel M M, Pan Z, Amaratunga K S P, et al. Catalytic infrared dehydration of onions [J]. Journal of Food Science, 2010, 71(9): E351-E357

[6] XIAO H W, PAN Z, DENG L Z, et al. Recent developments and trends in thermal blanching-A comprehensive review [J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 101-127

[7] 郑霞,万江静,高振江.红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望[J].江苏农业科学,2015,43(10):1-6
ZHENG Xia, WAN Jiang-jing, GAO Zhen-jiang. Research status and prospects of infrared drying technology in fruit and vegetable processing [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 1-6

[8] Baysal T, Icier F, Ersus S, et al. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic [J]. European Food Research & Technology, 2003, 218(1): 68-73

[9] AFZAL T M, ABE T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2000, 26(2): 137-145

[10] Xie L, Mujumdar A S, Fang X M, et al. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes [J]. Food & Bioproducts Processing, 2017, 102: 320-331

[11] 王洪彩,张慤,王兆进.香菇中短波红外干燥的试验[J].食品与生物技术学报,2013,32(7):698-705
WANG Hong-cai, ZHANG Wei, WANG Zhao-jin. Experiments on short-wave infrared drying of lentinus edodes [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2013, 32(7): 698-705

[12] LAW C L. Color Change Kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427

- [13] WANG L, XU B, WEI B, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40
- [14] Bai J W, Xiao H W, Ma H L, et al. Artificial neural network modeling of drying kinetics and color changes of *ginkgo biloba* seeds during microwave drying process [J]. 2018
- [15] O'Callaghan J R, Menzies D J, Bailey P H. Digital simulation of agricultural drier performance [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1971, 16(3): 223-244
- [16] PAGE G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers [J]. 1949
- [17] Henderson S M, Pabis S. Grain drying theory, II. Temperature effects on drying coefficients [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1961, 44(2): 1111-1122
- [18] Z E, F I. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results [J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2010, 50(5): 441-464
- [19] 马宏飞, 卢生有, 韩秋菊. 紫外分光光度法测定五种果蔬中维生素 C 的含量[J]. *化学与生物工程*, 2012, 29(8): 92-94
MA Hong-fei, LU Sheng-you, HAN Qiu-ju. Determination of Vitamin C in five fruits and vegetables by UV spectrophotometry [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2012, 29(8): 92-94
- [20] DAI X, LUO H, JIANG L, et al. Efficacy of different sanitizing agents and their combination on microbe population and quality of fresh-cut Chinese chives [J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(7): M348-M53
- [21] 陈凯. 枸杞红外干燥工艺研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016
CHEN Kai. Research on infrared drying process [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016
- [22] 张丽丽, 王相友. 红外辐射干燥胡萝卜的试验研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(6): 119-122
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you. Experimental study on drying carrots by infrared radiation [J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(6): 119-122
- [23] 张磊, 余筱洁, 白峻文. 红外干燥方式对紫甘蓝干燥特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(12): 202-209, 176
ZHANG Lei, YU Xiao-jie, BAI Jun-wen. Effects of infrared drying methods on drying characteristics of purple cabbage [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2017, 33(12): 202-209, 176
- [24] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001
LI Li-te. *Cruel Materialism* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001
- [25] WU B, PAN Z, QU W, et al. Effect of simultaneous infrared dry-blanching and dehydration on quality characteristics of carrot slices [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 57(1): 90-98
- [26] 马海乐, 王娟, 刘斌. 马铃薯片红外加热灭酶脱水试验及动力学[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 304-310
MA Hai-le, WANG Juan, LIU Bin. Enzymatic dehydration and kinetics of infrared heating of potato chips [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 304-310
- [27] Aruiz C, Lopezrodriguez F, Cuadros B F. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products [J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2009, 87(4): 247-253
- [28] FANG S, WANG Z, HU X, et al. Hot-air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): physicochemical properties of dried products [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(7): 1415-1421
- [29] CHEN Q, BI J, WU X, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 759-766