

丰水梨中短波红外干燥特性和品质变化规律

Drying characteristics with short- and medium- wave infrared and quality changing of hosui pear

唐璐璐^{1,2,3,4} 易建勇^{3,4} 毕金峰^{3,4}
TANG Lu-lu^{1,2,3,4} YI Jian-yong^{3,4} BI Jin-feng^{3,4}
陈芹芹^{3,4} 侯旭杰^{1,2} 刘璇^{3,4}
CHEN Qin-qin^{3,4} HOU Xu-jie^{1,2} LIU Xuan^{3,4}

(1. 塔里木大学生命科学学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 新疆特色农产品深加工兵团重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300;
3. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193; 4. 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)
(1. College of Life Sciences, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Construction Corps Key Laboratory of
Special Agricultural Products Further Processing in Southern Xinjiang, Alar, Xinjiang 843300, China; 3. Institute of
Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 4. Key Laboratory
of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

摘要:为了提高丰水梨片的品质, 缩短其干燥时间, 采用中短波红外干燥技术, 研究丰水梨在不同温度、辐射功率、辐照距离下的中短波红外干燥特性, 以及不同干燥条件对丰水梨片产品感官质量的影响。结果表明: 丰水梨片在各干燥条件下的整个干燥过程中属于降速干燥, 有效水分扩散系数 D_{eff} 范围为 $8.6226 \times 10^{-10} \sim 2.2077 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 其中干燥温度对丰水梨片干燥影响最大。干燥温度 65°C 、辐射距离 120 mm、辐射功率 1 350 W 时干制品的感官品质较优, 干基含水率为 0.104 8 g/g, L 值为 62.70, ΔE 值为 7.10, 脆度为 4.67 mm。

关键词: 梨; 中短波红外干燥; 温度; 辐射距离; 辐射功率

Abstract: In order to improve the qualities of dried hosui pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai.) slices and shorten the drying time, short- and medium- wave infrared drying was applied to drying hosui pear slices. The effects of drying temperatures, drying power, and radiation distances on the drying characteristic of hosui pear were investigated. Meanwhile, the impact of short- and medium- wave infrared drying on color, texture and moisture content of dried hosui pear were analyzed. The results showed that the drying procedure appeared as a falling rate period. The water effective diffusion coefficient (D_{eff}) of hosui pear ranged from $8.6226 \times 10^{-10} \sim 2.2077 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ under

short- and medium- wave infrared drying condition. The drying temperature was the most influential factor on the drying processing. The quality of pear slice was optimized when the drying temperature was 65°C , drying power was 1 350 W and the radiation distance was 120 mm. Under this condition, the L value was 62.7, the ΔE value was 7.10 and the brittleness was 4.67 mm.

Keywords: hosui pear; short- and medium- wave infrared drying; temperature; radiation distances; radiated power

梨 (*Pyrus spp*) 属于蔷薇科 (*Rosaceae*) 梨属 (*Pyrus*)。丰水梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai. ‘Hosui’) 属砂梨系统, 是日本培育的中熟梨品种, 因其结果早, 适应性强, 丰产性稳定, 已成为中国梨主栽品种之一^[1]。丰水梨采收期短, 不耐储藏, 销售期过于集中, 采后损失较大^[2], 而干燥可有效延长梨保存期, 提高利用率。目前, 国内外对梨进行干燥的方法主要有热风干燥技术^[3]和太阳能干燥技术^[4]。传统的热风干燥和太阳能干燥具有耗时和产品品质低的缺点^[5-6], 故有必要采取有效措施以提高干燥速率和产品品质。中短波红外干燥作为近年新兴的干燥技术, 能够使物料吸收红外线, 具有较高的传热效率使得物料内外受热均匀, 从而缩短干燥时间, 提高干燥效率^[7]; 还可有效降低物料本身营养成分的损失, 保持产品的色泽; 同时还具有设备简单, 成本低的特点。将中短波红外干燥应用在梨上的研究尚未见报道。本研究主要探讨中短波红外干燥过程中温度、辐射功率和辐射距离对丰水梨干燥特性和感官品质的影响, 旨在该技术应用于梨脆片加工提供技术和理论支撑。

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (编号: 201303077)

作者简介: 唐璐璐 (1989—), 女, 塔里木大学在读硕士研究生。

E-mail: 124991926@qq.com

通讯作者: 侯旭杰

收稿日期: 2015-09-19

1 材料与方法

1.1 材料

丰水梨:购自北京市海淀区清河小营果品批发市场,剔除烂果,挑选新鲜无虫害且质量在 300~350 g 的原料作为试验材料,储藏于(4.0±0.5)℃的冷库中。

1.2 仪器设备

中短波红外干燥设备:STC 型,圣泰科红外科技有限公司。其主要由红外灯管、风机、触摸显示屏、干燥室、载物板等组成,见图 1。整机功率为 2 275 W,整机尺寸 0.65 m×0.55 m×0.80 m,干燥室尺寸 0.26 m×0.35 m×0.40 m。中短波红外灯管有两种,两种不同的灯管平行且相互交错悬挂。两种红外灯管共 6 支,其中 3 支功率为 225 W,波长为 2.3 μm;3 支功率为 450 W,波长为 3.0 μm。红外辐射灯管在载物板上方,与载物板的距离分别为 80,120,160 mm。可由图 1 中的 10 设置红外灯管的辐射功率,13 设定干燥温度,7 调节辐射距离。

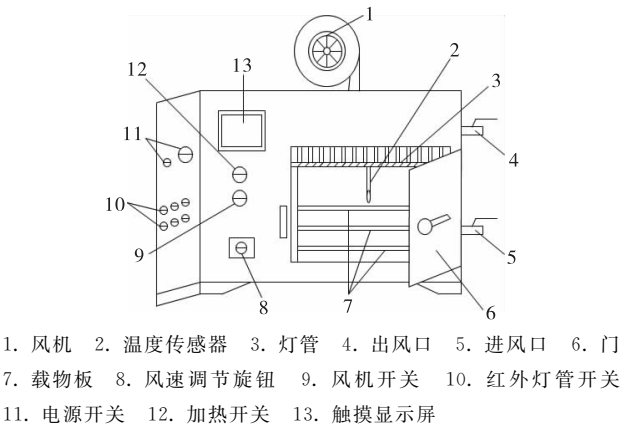


图 1 中短波红外干燥示意图

Figure 1 Apparatus of short- and medium- wave infrared drying oven

切片机:FA-200 型,广东省南海市德丰电热设备厂;
电子天平:AUW220 型,日本岛津公司;
质构仪:Ta. XT 2i/50 型,英国 Stable Micro System 公司;
色彩色差仪:D25L 型,美国 Huterlab 公司;
电热恒温干燥箱:DHG-9023A 型,上海精宏实验设备有限公司。

1.3 试验方法

试验前,将原料去皮并切成 6 mm 厚的薄片,四分切后去核取大小相近的丰水梨片(400±5) g 单层平铺到托盘上,通过图 1 中的 9、10、11、12、13 打开并设置中短波红外干燥设备干燥条件,并且通过 8 将风速调至 1 m/s,待设备达到设定条件后放入。初期每隔 5 min 取样称重,记录样品质量变化,中期每隔 15 min 取样称重,记录样品质量变化,后期每隔 30 min 取样称重,记录样品质量变化。直到质量变化小于 0.02 g/30 min 时停止试验。在预试验基础上,依据单因素试验设计,将本试验的干燥条件设计见表 1。

表 1 干燥条件设计

Table 1 Design for drying condition

试验序号	干燥温度/℃	辐射距离/mm	辐射功率/W
1	55	120	1 350
2	65	120	1 350
3	75	120	1 350
4	85	120	1 350
5	95	120	1 350
6	65	120	675
7	65	120	2 025
8	65	80	1 350
9	65	160	1 350

1.3.1 试验参数的计算 丰水梨的中短波红外干燥特性曲线是采用水分比随干燥时间变化的曲线。水分比表示在一定干燥条件下物料的剩余水分率,按照式(1)计算^[8]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

(1)

式中:

MR ——水分比;

M₀ ——初始的干基含水率,g/g;

M_e ——干燥到平衡时的干基含水率,g/g;

M_t ——*t* 时刻的干基含水率,g/g。

由于丰水梨片的 M₀ 和 M_t 远大于 M_e, 因此式(1)可以简化为式(2):

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

(2)

干燥速率按式(3)计算^[9]:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1}$$

(3)

式中:

DR ——干燥速率,g/(g·min);

M_{t₁}、M_{t₂} ——分别为干燥过程中 *t*₁ 和 *t*₂ 时丰水梨片的干基含水率,g/g。

干基含水率按式(4)计算:

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

(4)

式中:

W_t ——*t* 时刻的干基含水率,g/g;

G ——干物质质量,g。

有效水分扩散系数 D_{eff} 用 Crank^[10] 提出的菲克扩散方程计算,菲克方程见式(5):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4 L_0^2}\right]$$

(5)

式中:

D_{eff} ——有效水分扩散系数,m²/s;

L₀ ——丰水梨片厚度的一半,m。

对于长时间的干燥,式(5)两边取自然对数得到方程式(6):

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 L_0^2} \tag{6}$$

绘制等式(6)中 $\ln MR$ 相对于干燥时间 t 的关系曲线,将该曲线进行线性拟合得到新的曲线,其斜率可用式(7)表示:

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 L_0^2} \tag{7}$$

式中:
 k —— $\ln MR$ 与干燥时间 t 的关系曲线的斜率;
通过式(7)即可算得不同干燥条件下的 D_{eff} 。

1.3.2 色泽 由 HunterLab-D25LT 型色彩色差计测定与评价,其中 L 表示明度指数, $L=0$ 指黑色, $L=100$ 指白色; a 、 b 表示一个直角坐标的两个方向, a 为正值且值越大,说明颜色越接近红色; $a=0$ 时为灰色; a 为负值且其绝对值越大,说明颜色越接近绿色。 b 为正值且值越大,说明颜色越接近黄色; $b=0$ 时为灰色; b 为负值且其绝对值越大,说明颜色越接近蓝色。分别测定新鲜和干燥后样品的 L 、 a 、 b 值,按式(8)计算 ΔE 值。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2} \tag{8}$$

式中:
 L 、 a 、 b —— 干燥样品的测定值;
 L^* 、 a^* 、 b^* —— 鲜样的测定值。
每组样品测 3 次,取其平均值。

1.3.3 硬度和脆度 在同组干燥样品中,取大小、形状基本一致的丰水梨干燥产品,用 TA-XT2i/50 型物性测定仪测定干燥产品的硬度和脆度。每组样品重复 10 次,去除最大值和最小值后取平均值。

仪器参数设置:探头模式为阻力测试;前期测试速度 1.0 mm/s;检测速度 1.0 mm/s;后期测试速度 2.0 mm/s;测试距离 15 mm;采集数据速率:500 次/s;探头为 HDP/CFS。

在采集的数据中,用 Force2 表示硬度,单位为“g”,数值越大,说明产品硬度越大;用 Distance2 表示脆度,单位为“mm”,数值越大,说明脆度越小。

1.3.4 干基含水率 取干燥产品 2~3 g,精确到 0.000 1 g,置于已恒重的铝盒中,放于 105 ℃ 烘箱烘至恒重,即每隔 30 min 称重,直至前后质量差小于 0.005 g 为止,记录数据,计算出样品的干基含水率,单位为 g/g。每组样品做 3 组平行,取其平均值。

1.4 数据分析

利用软件 SPSS 17.0 进行数据显著性分析,用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 干燥特性

2.1.1 干燥温度对丰水梨中短波红外干燥特性的影响 由图 2(a)可知,丰水梨的水分比随干燥时间的增加而降低,并且干燥温度越高,水分降低得越快,至干燥终点的时间越短。干燥温度分别为 55,65,75,85,95 ℃ 的条件下,丰水梨的干燥时间分别为 330,270,240,210,180 min。由图 2(b)可知,丰水梨的干燥速率随着温度的增加而增加。这是由于干燥室内环境的相对湿度会随着干燥温度的升高而降低,物料和环境温差和湿度差也变大,干燥速率随之变大^[11]。同时可以看出,丰水梨在整个干燥过程没有恒速阶段,这一结论类似于 Milly A. Pekke^[12] 的探究。这说明丰水梨在干燥过程中主要以水分迁移、扩散为主^[12-13]。

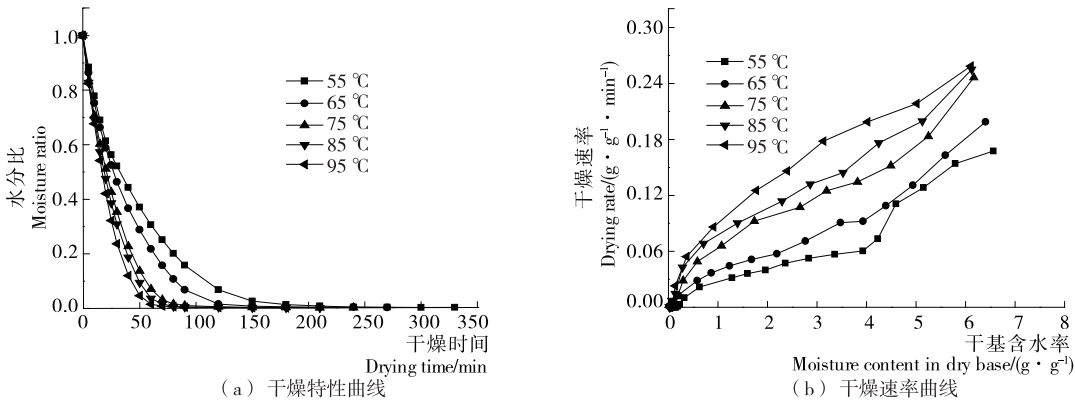


图 2 不同干燥温度下丰水梨中短波红外干燥特性曲线和干燥速率曲线

Figure 2 Drying curves and drying rate curves of hosui pear under different drying temperature

2.1.2 辐射功率对丰水梨中短波红外干燥特性的影响 由图 3(a)可知,干燥时间随辐射功率的增加而缩短,辐射功率越大,水分比降低得越快。原因在于物料中物质分子对红外辐射能量产生共振吸收使分子内能增加,表现出物料内部温度升高,使物料具有内高外低的温度梯度和含水量梯度,在两种梯度同时作用下,内部的水分不断扩散^[14]。辐射功率越大,水分扩散越快。当辐射功率分别为 675,1 350,2 025 W

时,丰水梨片的干燥时间分别为 300,270,270 min。图 3(b)表明随着辐射功率增加,干燥速率也加快。这一结论类似于 Doymaz I^[15] 研究的甘薯红外干燥特性。Doymaz I^[15] 的研究中随着辐射功率的增加平均干燥速率增加 2.57 倍。在试验范围内可以看出辐射功率对丰水梨干燥特性的影响与干燥温度对其影响类似,但干燥温度对干燥时间的影响较辐射功率对其影响更为明显。

2.1.3 辐射距离对丰水梨中短波红外干燥特性的影响 不同辐射距离对丰水梨中短波红外干燥特性的影响见图 4。丰水梨的干燥时间随着辐射距离的增加而增加，干燥速率降低。当辐射距离分别为 80,120,160 mm 时，丰水梨片的干燥时间分别为 270,300,300 min。由图 4(b)可知，当丰水梨的含水率降低到一定程度时，3 个辐射距离的干燥速率曲线基

本重合。辐射距离越小，干燥速率越大。可能是当辐射距离越小时物料周围的热流密度越大，同时吸收的能量越多，水分扩散的越快，这一结论与 Dorota 等^[16]的研究类似，其研究表明苹果片的干燥速率与辐射距离成反比。从干燥时间来看，辐射距离对干燥特性有影响，但在试验范围内辐射距离带来的影响程度明显低于干燥温度对其的影响。

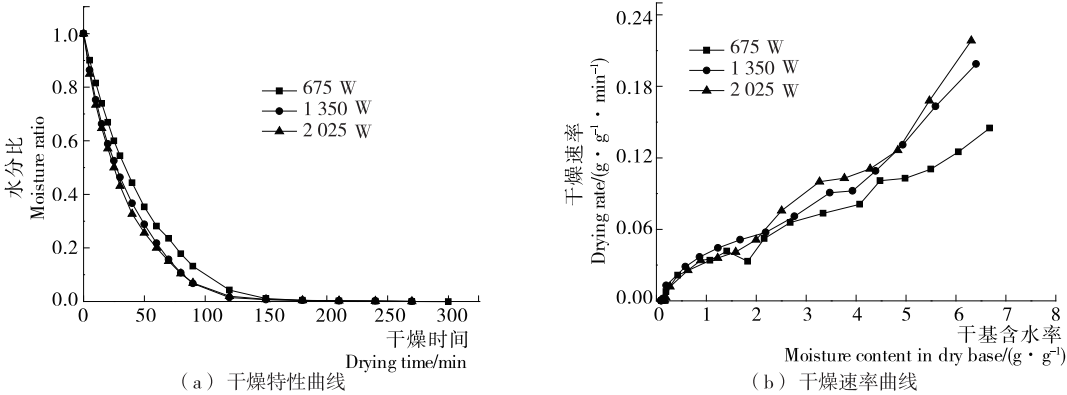


图 3 不同辐射功率下丰水梨中短波红外干燥特性曲线和干燥速率曲线
Figure 3 Drying curves and drying rate curves of hosui pear under different radiated power

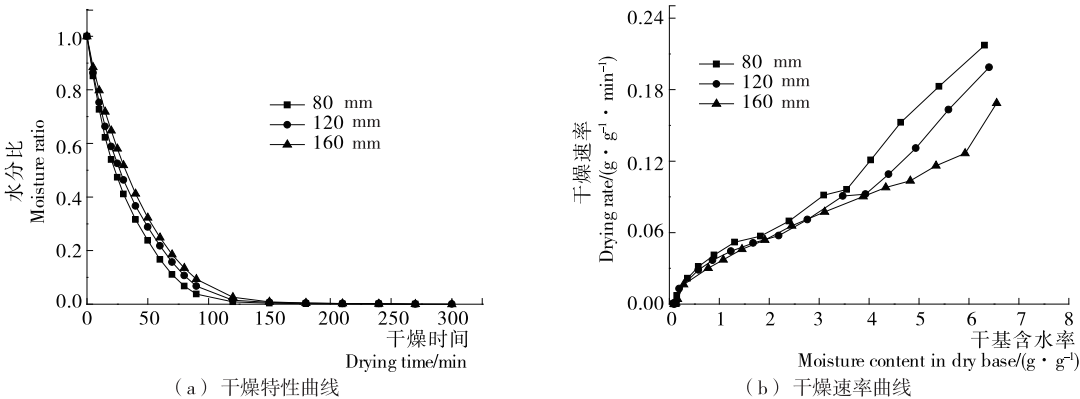


图 4 不同辐射距离下丰水梨中短波红外干燥特性曲线和干燥速率曲线
Figure 4 Drying curves and drying rate curves of hosui pear under different radiation distances

2.2 中短波红外干燥条件对丰水梨片水分有效扩散系数的影响

丰水梨片在干燥中呈现降速干燥过程，表明丰水梨片的干燥过程由物料表面水分蒸发及内部水分的迁移控制^[17]。可以用 Crank^[10]提出的菲克扩散方程计算，结果见表 2。由表 2 可知，在试验范围内，丰水梨片在不同温度、辐射功率和辐射距离条件下干燥的有效水分扩散系数范围在 $8.622\ 6\times 10^{-10}\sim 2.207\ 7\times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。干燥温度、辐射功率、辐射距离对有效水分扩散系数均有影响，其中干燥温度影响较为显著。水分有效扩散系数随干燥温度的升高而增大，这一趋势与 Ibrahim^[18]的研究结果一致；同时可以得出水分扩散系数随辐射距离的增大而减小，随着辐射功率的增加而增大，这一趋势与 Dorota^[16]的研究结果相似。

2.3 干燥条件对丰水梨品质变化规律的影响

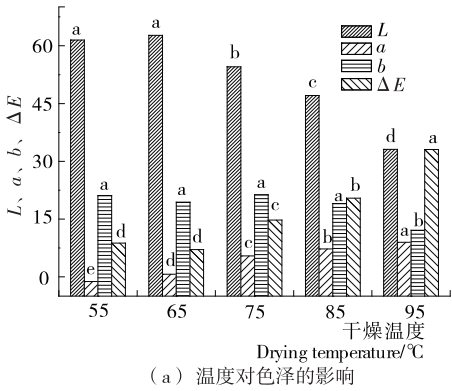
2.3.1 干燥温度对丰水梨品质变化规律的影响 由图 5(a)可知，干燥温度对干燥后的丰水梨片的色泽有显著影响。L 值

表 2 中短波红外干燥条件对丰水梨片水分有效扩散系数的影响

Table 2 Effect of short- and medium- wave infrared drying conditions on the effective moisture diffusion coefficients of hosui pear slice

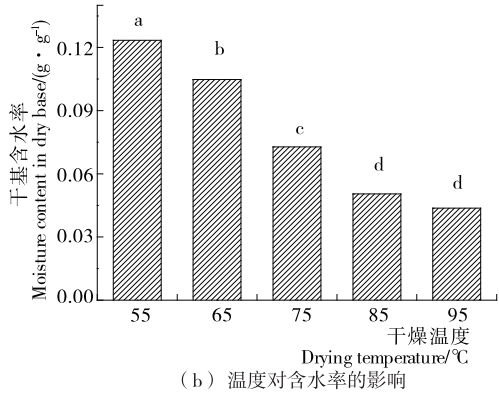
序号	处理条件			决定系数 R^2	有效扩散系数 $D_{eff}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	辐射功率/ W	辐射距离/ mm		
1	55	1 350	120	0.970 8	$8.622\ 6\times 10^{-10}$
2	65	1 350	120	0.952 9	$1.099\ 8\times 10^{-9}$
3	75	1 350	120	0.905 7	$1.381\ 2\times 10^{-9}$
4	85	1 350	120	0.928 6	$1.985\ 8\times 10^{-9}$
5	95	1 350	120	0.918 0	$2.207\ 7\times 10^{-9}$
6	65	675	120	0.969 2	$1.008\ 8\times 10^{-9}$
7	65	2 025	120	0.949 6	$1.011\ 2\times 10^{-9}$
8	65	1 350	80	0.949 9	$1.241\ 6\times 10^{-9}$
9	65	1 350	160	0.963 3	$1.055\ 0\times 10^{-9}$

在 65 ℃ 时达到最高,可能与其中的酶有关。65 ℃ 以后温度越高, L 值越低,可能是因为丰水梨中糖类物质分解发生了美拉德反应。由此看出适当的低温可以得到更高的 L 值,即干制品的色泽较好。此结论类似于 Kamil 等^[19] 和 Zhu Yi 等^[20] 的研究结论,Zhu Yi 等^[20] 的研究表明温度的升高可以加快物料表面和中心的温度激活物料中的酶,而较低的温度可以抑制酶的激活,从而保证更好的色泽。 a 值和 ΔE 值也



随着温度的升高而增大,即干制品的色泽与鲜样偏差越大,55 ℃ 和 65 ℃ 干制品 ΔE 值没有显著性差异。

由图 5(b)可知,干燥产品的含水率随干燥温度的增加而显著降低,但 85 ℃ 和 95 ℃ 下的样品含水率差异不显著,说明干燥温度对干燥产品的含水率影响较大。当干基水分含量低于 0.14 g/g 时即为安全含水率^[21],可有效延长货架期的同时可提高产品质量。



不同小写字母表示差异显著
图 5 干燥温度对丰水梨色泽和含水率的影响

Figure 5 Effect of hosui pear slices' color value and moisture content under drying temperature

不同干燥条件对产品硬度及脆度的影响见表 3。硬度的变化与干燥温度之间的关系不呈现规律性,较高或者较低的温度都会导致产品硬度增加,可能是因为较高的干燥温度和较长的干燥时间都会导致产品硬度增大。脆度随着温度的增加而显著性增加。这可能是因为温度越高,产品的含水率越低,故脆度越大。

2.3.2 辐射功率对丰水梨片品质变化规律的影响 由图 6(a)可知,3 组产品的 L 值不存在显著性差异,675 W 和 2 025 W 条件下产品的 ΔE 值不存在显著性差异,说明不同辐射功率对丰水梨片的 ΔE 值影响较小。但该两组与 1 350 W 条件下的产品存在显著性差异,1 350 W 条件下的产品具有较低的 ΔE 值,说明该条件下的产品与鲜样色泽最接近。

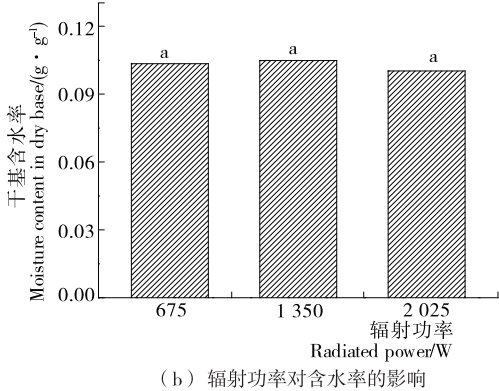
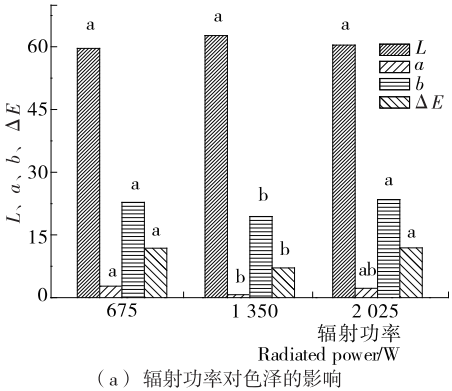
由图 6(b)可知,3 组干燥后的丰水梨片有着相近的干基含水率,且相互之间差异不显著,说明不同辐射功率对丰水梨片干燥产品的含水率影响较小,但均在安全水分含量范围内。

表 3 干燥条件对丰水梨片硬度、脆度的影响[†]

Table 3 Effect of hosui pear slices' Hardness and brittleness under different drying conditions

序号	处理条件			硬度/g	脆度/mm
	温度/℃	辐射功率/W	辐射距离/mm		
1	55	1 350	120	785.16±82.43 ^e	6.08±1.04 ^{ab}
2	65	1 350	120	973.15±81.26 ^{bcd}	4.67±1.41 ^{bc}
3	75	1 350	120	846.02±84.80 ^{de}	1.56±0.82 ^d
4	85	1 350	120	520.13±86.81 ^f	0.36±0.17 ^d
5	95	1 350	120	898.90±64.78 ^{cde}	0.44±0.22 ^d
6	65	675	120	1 153.06±69.65 ^a	5.47±1.41 ^{abc}
7	65	2 025	120	1 092.89±71.97 ^{ab}	6.50±1.72 ^a
8	65	1 350	80	1 080.26±121.11 ^{ab}	5.48±1.31 ^{abc}
9	65	1 350	160	1 023.48±62.69 ^{abc}	4.20±1.18 ^c

[†] 不同小写字母表示差异显著。



不同小写字母表示差异显著
图 6 辐射功率对丰水梨色泽和含水率的影响

Figure 6 Effect of hosui pear slices' color value and moisture content under drying radiated power

由表 3 可知,随着辐射功率的增加,硬度和脆度均表现出不规律的变化,且差异不显著,其中 1 350 W 条件下的产品硬度最小,脆度最大,根据干燥速率曲线可知,随着辐射功率的增加,干燥速率增加,硬度和脆度的变化可能与干燥时间和物料中水分扩散快慢有关,水分扩散过快或者过慢都会导致硬度的增加。

2.3.3 辐射距离对丰水梨片品质变化规律的影响

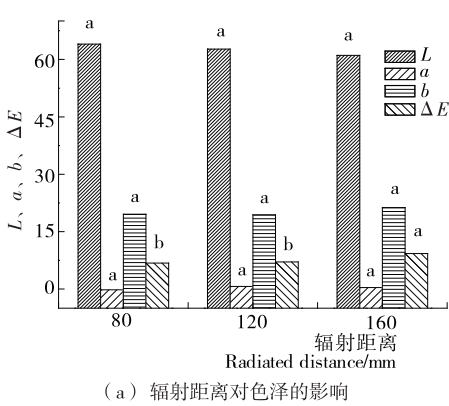
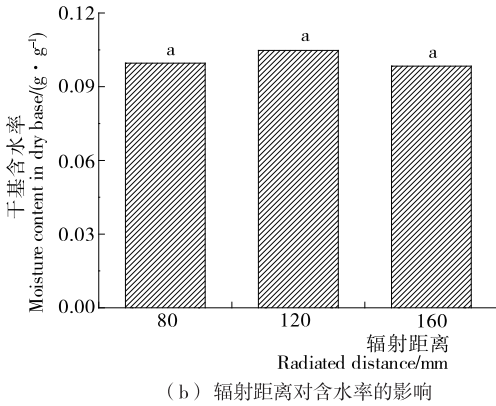


图 7(a)可知,随着辐射距离的增加,丰水梨片的 L 值、 a 值与 b 值没有呈现出显著性规律, ΔE 值随着辐射距离的增加而显著增加,80 mm 和 120 mm 条件下产品的 ΔE 值差异不显著。这可能是因为辐射距离过小时,干燥速率较快,丰水梨中的营养物质发生美拉德反应的程度小;而干燥距离过大时,红外辐射较分散,干燥速率较慢,发生美拉德反应更充分,导致色差 ΔE 值较大。



(a) 辐射距离对色泽的影响
(b) 辐射距离对含水率的影响
不同小写字母表示差异显著

图 7 辐射距离对丰水梨色泽和含水率的影响

Figure 7 Effect of hosui pear slices' color value and moisture content under radiation distances

由图 7(b)可知,干基含水率没有随着辐射距离的增加而减小,它们之间存在的差异不显著,呈现出与不同辐射功率下产品含水率同样的变化趋势,均在安全水分含量范围内。

由表 3 可知,辐射距离越大,干燥产品脆度也越大,但辐射距离为 120 mm 和 160 mm 的样品脆度差异不显著,硬度表现出与不同辐射功率下产品硬度变化同样的规律。可能是因为距离增大,中短波红外辐射较分散,导致水分扩散的较慢,从而影响最终产品硬度与脆度。

3 结论

试验范围内,干燥温度、辐射功率和辐射距离对丰水梨的干燥特性均有影响,温度越高、辐射功率越大、辐射距离越小,干燥速率快,干燥时间也最短。从干燥时间来看,温度对其影响程度最大。

根据菲克第二定律得出中短波红外干燥丰水梨的有效水分扩散系数范围为 $8.622\ 6\times10^{-10}\sim2.207\ 7\times10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$,有效水分扩散系数随着干燥温度的增大而增大,随着辐射距离的增加而减小,随着辐射功率的增大而增大。

干燥温度对丰水梨片产品的色泽、含水率、脆度具有显著影响,辐射距离较辐射功率对色泽脆度等影响较大。综合得出,干燥温度 65 ℃,辐射距离 120 mm,辐射功率 1 350 W 是丰水梨片中短波红外干燥较优的工艺条件。在此条件下产品的干基含水率为 0.104 8 g/g, L 值为 62.70, ΔE 值为 7.10,脆度为 4.67 mm。

2 邵明灿. 丰水梨贮藏技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005: 9~12.

3 刘云宏, 吴建业, 刘建学, 等. 超声渗透脱水—热风干燥梨的研究[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 23~28.

4 Guiné R, Lopes P, Barroca M J, et al. Effect of ripening stage on the solar drying kinetics and properties of *S. bartolomeu* pears (*Pyrus communis* L.)[J]. International Journal of Academic Research, 2009, 1(1): 354~402.

5 Vega-Mercado H, Gongra-Nieto M M, Barbosa-Cánovas G V. Advances in dehydration of foods[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(3): 271~289.

6 Raquel P F Guiné, Maria João Barroca, Maria João R Lima. Comparative study of the drying of pears using different drying systems[J]. International Journal of Fruit Science, 2011, 11(1): 55~73.

7 高扬, 解铁民, 李哲滨, 等. 红外加热技术在食品加工中的应用及研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 218~222.

8 Joykumar Singh N, Pandey R K. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(2): 317~322.

9 Doymaz I, Ismail O. Drying characteristics of sweet cherry[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(1): 31~38.

10 Crank J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1975.

11 高鹤, 易建勇, 刘璇, 等. 番木瓜热风干燥特性分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 38~42.

12 Pekke M A, Pan Z L, Atungulu G G, et al. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2013, 6(3): 58~70.

参考文献

1 李秀根, 阎志红. 日本“三水”梨在我国的栽培现状、存在问题及发展对策[J]. 山西果树, 1998(3): 3~4.

2005, 21(5): 77~80.

4 李巧巧, 雷激, 唐洁, 等. 商品柑橘精油的抑菌性及其应用研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 160~162.

5 Ma Ying-ying, Zhong Yun-ting, Yang Jian-gang, et al. A comparative study between solvent and micro-wave assisted extraction technology of pigment from orange peel[J]. Journal of Chemical & Pharmaceutical Research, 2014, 6(8): 338~346.

6 凌关庭. 食品添加剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 46.

7 Sharma N, Tripathi A. Fungitoxicity of the essential oil of Citrus sinensis on post-harvest pathogens[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, 22(6): 587~593.

8 Jameel Jhalegar MD, Sharma RR, Singh D. In vitro and in vivo activity of essential oils against major postharvest pathogens of Kinnow (*Citrus nobilis* × *C. deliciosa*) mandarin[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(4): 2 229~2 237.

9 刘义武, 王碧. 柠檬营养成分与综合利用研究进展[J]. 内江师范学院学报, 2014, 27(8): 46~51.

10 付复华, 李忠海, 单杨, 等. 柑橘皮渣综合利用技术研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 178~184.

11 万利秀, 肖更生, 徐玉娟, 等. 柑橘皮黄酮纯化前后抗氧化性比较研究[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 87~91.

12 关海宁, 刁小琴, 张润光. 柑橘皮功能性成分研究现状及发展前景[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(9): 169~172.

13 张志军, 刘西亮, 李会珍, 等. 植物精油提取方法及应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(4): 118~121.

14 张志杰, 肖爱琴, 王朝君. 用正交实验法探讨精油提取的工艺[J]. 河南中医药学刊, 2000, 15(5): 42~43.

15 乔宇, 谢笔钧, 张弛, 等. 顶空固相微萃取—气质联用技术分析3种柑橘果实的香气成分[J]. 果树学报, 2007, 24(5): 699~704.

16 Larsen M, Poll L. Odour thresholds of some important aroma compounds in strawberries[J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1992, 195: 120~123.

17 洪鹏, 陈峰, 杨远帆, 等. 三种柚子精油的香味特征及挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2014, 30(10): 274~281.

18 Ruberto G, Renda A, Piattelli M, et al. Essential oil of two new pigmented Citrus Hybrids, *Citrus clementina* × *Citrus sinensis*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45: 467~471.

19 Kelebek M, Selli S. Determination of volatile, phenolic, organic acid and sugar components in a Turkish cv. Dortyol (*Citrus sinensis* L. Osbeck) orange juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91: 1 855~1 862.

20 Takeoka GR, Flath RA, Mon RM, et al. Volatile constituents of apricot (*Prunus armeniaca*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38: 471~477.

21 Oliveiraa JM, Araújo IM, Pereira ÓM, et al. Characterization and differentiation of five “Vinhos Verdes” grape varieties on the basis of monoterpenic compounds[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 513(1): 269~275.

22 Pino J A, Mesa J, Munoz Y, et al. Volatile components from mango (*Mangifera indica* L.) cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53: 2 213~2 223.

23 Plotto A, Margaria CA, Goodner KL, et al. Odour and flavor thresholds for key aroma components in an orange juice matrix: ester and miscellaneous compounds[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2008, 23(6): 398~406.

24 Tamura H, Padrayuttawat A, Tokunaga T. Seasonal change of volatile compounds of Citrus sudachi during maturation[J]. Food Science Technology Research, 1999, 5(2): 156~160.

25 Zhong Si-qiong, Ren Jing-nan, Chen De-wen, et al. Free and bound volatile compounds in juice and peel of eureka lemon[J]. Food Science and Technology Research, 2014, 20(1): 167~174.

26 黄丽. 芒果皮香精提取过程中酶解增香技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012: 61.

27 Schulz S, Girhard M, Gaßmeyer, SK, et al. Selective enzymatic synthesis of the grapefruit flavor (+)-nootkatone[J]. Chemcatchem, 2015, 7(4): 601~604.

28 Petosi P, Viti R. Specific anosmia to l-carvone: the minty primary odour[J]. Chemical Senses, 1978, 3(3): 331~337.

29 陈玲娟, 赵良忠, 林亲录, 等. 超临界 CO₂萃取雪峰蜜橘橘皮精油的中试条件研究[J]. 食品科学, 2011, 32(2): 120~123.

30 Jia Ming-yu, Zhang QH, Min DB. Optimization of solid-phase microextraction analysis for headspace flavor compounds of orange juice[J]. Journal Agricultural Food Chemistry, 1998, 46: 2 744~2 747.

31 单杨, 李忠海. 固相微萃取/气相色谱—质谱法分析温州蜜柑精油挥发性成分[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 421~424.

(上接第 69 页)

13 Brennan H G, Butters J R, Cowell N D, et al. Food engineering operations[M]. London: Elsevier Applied Science, 1990.

14 张丽霞, 张勋, 孙佳佳, 等. 红外干燥对芝麻品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 63~70.

15 Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760~766.

16 Dorota Nowak, Lewicki P P. Infrared drying of apple slices[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5(3): 353~360.

17 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318~323.

18 Ibrahim Doymaz. Effect of citric and blanching pre-treatments on drying and rehydration of amasya red apples[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(2): 124~132.

19 Kamil Sacilik, Ahmet Konuralp Elicin. The thin layer drying characteristics of organic apple slices[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(3): 281~289.

20 Zhu Yi, Pan Zhong-li. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4): 441~452.

21 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277~284.