

# 红外干燥方式对紫甘蓝干燥特性的影响

张磊, 余筱洁, 白峻文, 徐沛, 马海乐, 周存山

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 采用干燥方式可延长紫甘蓝货架期, 红外干燥具有较强的穿透能力, 适合叶片型蔬菜的干燥。但是红外干燥时, 干燥参数设置不合理, 反而会带来一些副作用, 对干制品品质产生一定的影响。因此, 研究了不同干燥温度(40 °C、50 °C、60 °C、70 °C和80 °C)、红外辐射距离(5 cm、11 cm和16 cm), 红外辐射功率(225 W、450 W、675 W、900 W和1125 W)以及风速(10 m/s、20 m/s和26 m/s)对紫甘蓝干燥速率、复水率和褐变程度的影响。干燥温度越高, 紫甘蓝干燥速率越快。不同红外辐射距离、辐射功率和风速对样品干燥速率影响不太明显。另外, 干燥温度和辐射功率对样品复水率影响较大, 随着温度升高, 复水率增加; 当辐射功率为675 W时, 复水率最大。鉴于温度和能耗的关系, 选择60 °C作为干燥温度、11 cm为红外辐射距离、675 W作为红外辐射功率以及20 m/s为干燥风速, 该研究为红外干燥技术的广泛应用提供了借鉴标准。

**关键词:** 红外干燥; 紫甘蓝; 干燥特性

文章编号: 1673-9078(2017)12-202-209

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.12.030

## Effects of Infrared Drying Technology on Drying Characteristics of Purple Cabbage

ZHANG Lei, YU Xiao-jie, BAI Jun-wen, XU Pei, MA Hai-le, ZHOU Cun-shan

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

**Abstract:** The shelf life of purple cabbage could be prolonged by using drying technology. The infrared drying technology had a stronger penetrating capacity, which was suitable for drying of leaf vegetables. Effects of different drying temperature (40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C), infrared radiation distance (5 cm, 11 cm, 16 cm), infrared radiation power (225 W, 450 W, 675 W, 900 W, 1125 W) and air speed (10 m/s, 20 m/s, 26 m/s) on the drying rate, rehydration rate and browning degree of purple cabbage were investigated in this study. Results showed that the drying rate of purple cabbage increased with the increase of temperature, and the radiation distance, infrared radiation power and air speed had little effects on the drying characteristics of purple cabbage. The rehydration rate of samples was greatly affected by drying temperature and infrared radiation power and increased with the increase of temperature, and the highest peak of rehydration rate appeared at 675 W. The drying conditions, based on temperature and energy consumption, were as follows: temperature, 60°C, radiation distance, 11 cm, radiation power, 675 W, air speed, 20 m/s. This research provided reference for the widespread application of infrared drying technology.

**Key words:** infrared drying; purple cabbage; drying characteristics

紫甘蓝, 功效齐全、营养价值较高, 具有果蔬共同的特点, 即含水量较高, 很容易滋生微生物, 导致变质腐败, 造成较大的经济损失<sup>[1]</sup>, 迫切需要一种手段延长其货架期。干燥是一种有效的保藏方式<sup>[2]</sup>, 而且能够进一步提高紫甘蓝的附加价值, 为诸如调料包等的后期处理提供辅助条件。合适的干燥方式具有诸

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400705-04、2017YFD0400903-01); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2016169); 六大人材高峰项目(2015-NY-016)

作者简介: 张磊(1987-), 女, 博士, 讲师, 主要从事食品物理加工研究  
通讯作者: 周存山(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事物理场影响天然产物资源化及功能化研究

多优势, 如保存时间更长、使用更方便, 以及营养成分浓度增加等<sup>[3,4]</sup>。目前干燥方式有很多, 热风干燥是最常用的干燥方式, 造价相对便宜、使用简单, 但是由于温度较高, 不适合热敏性物料的干燥, 包括大多数的蔬菜和水果, 会导致物料内部元素发生化学降解<sup>[5]</sup>。相比之下, 冷冻干燥获得的物料的品质较高, 能够最大程度地维持内部营养成分、颜色、风味和质地等, 但是冷冻干燥能耗大并且成本高<sup>[6]</sup>。

红外干燥方式能有效代替热风干燥方式, 由于红外波长较长, 位于760 nm到1 mm之间, 因此具有较强的穿透能力<sup>[7]</sup>, 能够渗透到被加热物料的内部, 引起分子和原子之间的高速摩擦, 产生热量, 完成干燥过程, 减少对其品质的损伤, 这也是红外干燥区别于

其它干燥方式的特殊之处。在此过程中,物料内部水分的湿扩散与热扩散方向一致,加速了水分的内扩散<sup>[8]</sup>。干燥时间短且能源消耗低,更适合叶片型蔬菜的干燥<sup>[9]</sup>,如紫甘蓝等。但是,由于红外干燥时,物料表面温度等参数难以控制,不合理的红外干燥参数反而可能带来一些副作用,如表面过热、氧化、加热过于密集而引起的撞击损伤等<sup>[10]</sup>,因此,有必要对红外干燥设备进行设计,研究不同的红外干燥参数变化其对紫甘蓝干燥特性及品质的影响。

## 1 装置、材料与方法

### 1.1 控温红外干燥装置

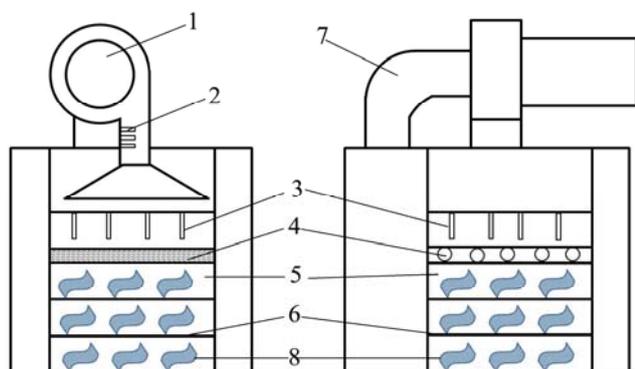


图1 控温红外干燥装置

Fig.1 Infrared drying device with temperature control

注:其中,1.风机;2.加热管;3.气流喷嘴;4.红外发射管;5.干燥室;6.物料架;7.回风管路;8.物料。

控温红外干燥装置由红外加热系统、控制系统、气流循环系统和干燥室组成,装置图如图1所示。所述的红外加热系统,由五根红外发射管组成,位于物料上方,每根红外发射管的辐射功率为225 W,交错排列,使得红外线均匀地作用到物料上。所述的控制系统,有五个开关组成,位于干燥室侧面,分别控制这五根红外发射管的工作;干燥室内部还配有一个温度传感器,用来监控干燥室内的温度;由于控制系统集成化,通过显示器可调节干燥所需的红外辐射功率,还可获得干燥室内的实时温度和设定温度。所述的气流循环系统,包括风机、加热管、气流喷嘴、回风口和回风管路,风机带动空气流动,经加热管被加热,形成热风到达干燥室,干燥室顶部设有整齐排列的气流喷嘴,热风经气流喷嘴均匀地喷射到干燥室中,便于带走室内的湿气,干燥室四周和底部设有很多回风口,用来将干燥室内夹带湿气的风抽出,并送入与回风管路相连的风机内,再由风机输送出来,形成气流环路,风速可通过控制系统进行调节,这种设计实现了热能的回收利用,很大程度上降低了热能损耗、节

约能源。所述的干燥室,有三层物料架,用来研究不同距离条件下,紫甘蓝的干燥特性。

红外干燥试验前,先进行装置的预热,气流喷嘴喷射出由风机吹进的热风,红外线辐射物料,蒸发其水分,干燥室里的湿空气经回风口送入回风管路,进入风机内,进行气流循环,同时设定好试验所需的干燥参数,预热完毕后,放入紫甘蓝进行干燥。

### 1.2 试验材料

紫甘蓝购于当地农贸市场,大小均匀、表面没有破损,没有发生霉变、颜色鲜亮。

SS-250型食品切片机(广州天地人机械有限公司生产)、SQP型电子秤(德国赛多力斯科学仪器有限公司)、HH-6型水浴锅(江苏金坛市亿通电子有限公司)、Color Quext XE型分光测色仪(美国 Hunter Lab 公司)、打粉机、尺子、铁丝筛网、不锈钢刀、培养皿和比色皿等。

### 1.3 干燥试验

将紫甘蓝外皮剥掉,并从中切开成两半,用不锈钢刀将菜根挖去,调节切片机的切片厚度到1 cm,再将半个紫甘蓝切成宽度为1 cm的条状,并均匀铺在铁丝筛网上、称重。通过对比不同干燥温度(40℃、50℃、60℃、70℃和80℃),红外辐射功率(225 W、450 W、675 W、900 W和1125 W),风速(26 m/s、20 m/s和10 m/s),辐射距离(5 cm、11 cm和16 cm)条件下的紫甘蓝干燥特性、复水率和色泽,获得最佳干燥条件。在红外干燥过程中,每隔半个小时记录一下紫甘蓝的质量,直到紫甘蓝每半个小时的质量变化不超过1 g为止,此时所得的紫甘蓝干制品的含水率已经达到干燥要求。取出干燥后的紫甘蓝干制品,等其冷却至室温后,装入塑料袋,排除里面的空气,封好袋口,标记并保存。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 初始含水率的测定

根据文献<sup>[11]</sup>测定紫甘蓝的初始含水率,取3个干净的培养皿,贴上标签,依次标号1、2和3号备用。将新鲜紫甘蓝切成厚度约2 mm的薄片,均匀平铺到3个培养皿中,称重,记为 $W_0$ ,并放进烘箱,每隔1 h称重,待恒重后取出,再称重,记为 $W_1$ ,算出初始含水率,重复三次求平均值。紫甘蓝初始含水率按公式

(1) 计算:

$$W_h = (W_0 - W_1) / W_0 \quad (1)$$

式中: $W_h$ 为紫甘蓝初始含水率, $W_0$ 为新鲜紫甘蓝的质量,

$W_1$  为绝干状态中的干物质的含水量。

本文中，测得紫甘蓝的初始含水率为 91.46%。

### 1.4.2 干燥特性曲线绘制

紫甘蓝干基含水率<sup>[12]</sup>的计算公式 (2) 如下：

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (2)$$

式中： $W_t$  为干燥中任意时刻  $t$  时紫甘蓝的质量， $G$  为干物质质量。

紫甘蓝水分比(MR, moisture ratio)<sup>[13]</sup>的计算公式如下：

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

式中： $M_0$  为紫甘蓝初始干基含水率， $M_e$  为平衡时刻干基含水率， $M_t$  为紫甘蓝在干燥中任意时刻的干基含水率。

因为公式 (3) 中达到安全含水率的紫甘蓝的  $M_e$  值非常小，所以公式 (3) 可以简化为<sup>[14]</sup>：

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

干燥速率(DR, drying rate)<sup>[15]</sup>的计算公式如下：

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

根据以上的计算公式，计算出干基含水率、水分比 MR、干燥速率 DR 的值，然后绘制干燥时间-水分比曲线和干基含水率-干燥速率曲线。

### 1.4.3 复水率的测定方法

复水率测定试验是从每组干燥好的紫甘蓝样品中取出三分之一左右，称重记录，复水前重量记为  $W_1$ 。取 8 个烧杯(水浴锅一次最多可放入 8 个烧杯)依次标号，加入一定量的去离子水，以便紫甘蓝可以全部没入水中，在水浴锅中加热至 60℃，并将取出称重好的紫甘蓝依次加入 8 个烧杯中进行复水试验。30 min 后取出、沥干并称重。复水后重量记为  $W_2$ 。复水率  $W_f$ <sup>[16]</sup> 按公式 (6) 计算：

$$W_f = \frac{W_2}{W_1} \quad (6)$$

式中： $W_1$  为干制紫甘蓝质量， $W_2$  为复水后紫甘蓝质量。

### 1.4.4 色泽的测定试验

由于紫甘蓝片经过干燥后会变成丝状，不便测定色泽，所以利用打粉机将丝状的紫甘蓝打成粉末进行测量。从干燥后的紫甘蓝样品中取出大约三分之二样品，放入打粉机中打成粉末，利用分光测色仪，将打成粉的紫甘蓝放入比色皿中，然后将比色皿光滑面放在测色仪的采光口前进行测色，为了防止减少误差，重复三次求平均值。待所有样品测完后关闭分光测色仪。

## 1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS Statistics 软件对试验数据进行统计与处理，前者主要用来研究红外干燥各项因素对紫甘蓝干燥动力学的影响，后者主要用来进行色泽分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 干燥温度对紫甘蓝干燥动力学的影响

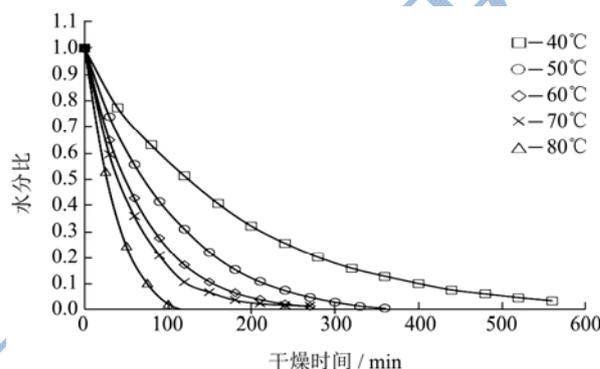


图 2 不同红外干燥温度下的水分比随着时间变化曲线

Fig.2 Curves of moisture ratio varied with drying time under different infrared radiation temperature

保持风速为中速状态，红外线辐射功率设为 450 W，辐射距离为中层，探究不同的红外干燥温度 (40℃、50℃、60℃、70℃和 80℃)，对紫甘蓝干燥特性的影响。图 2 所示的是不同红外干燥温度下，紫甘蓝的水分比关于时间的变化曲线。由图可知，整个干燥过程中，水分比逐渐变小，没有干燥恒速期。当干燥时间一定时，干燥温度越高，相对应的曲线斜率越大，即干燥速率越快，所花费的干燥时间就越短，可以看出 80℃ 的干燥用时仅仅是 40℃ 干燥用时的五分之一左右。

不同红外干燥温度下，紫甘蓝干基含水率和红外干燥速率关系曲线如图 3 所示。由图可以看出，随着干燥过程的不断进行，干基含水率越来越低，但是干燥速度也在不断降低。同时也很明显地可以看出，当干基含水率一定时，随着红外干燥温度地降低，干燥速率降低，80℃ 对应的干燥速率最快，而 40℃ 对应的干燥速率最慢。方蕾等人<sup>[17]</sup>研究了热风干燥温度对番木瓜干燥动力学的影响，获得了相似的结论，试验结果表明干燥温度越高，水分降低得越快、对应的干燥速率越大。刘艳等人<sup>[12]</sup>采用热风干燥方式对大果山楂片进行干燥，同样获得了相似的试验结果，干燥温度越高，山楂片的干基含水率就越低，干燥时间就越短。因为在一定的红外干燥温度范围内，干燥室内的

温度设定得越高,那么内部相对湿度就越低,紫甘蓝和干燥室内的空气温度差以及湿度差就越大,传热动力越大,水分蒸发速率快,干燥速率就越快,大大缩短了干燥时间。结合图2和3得出,干燥温度的高低显著影响紫甘蓝的干燥动力学特性。

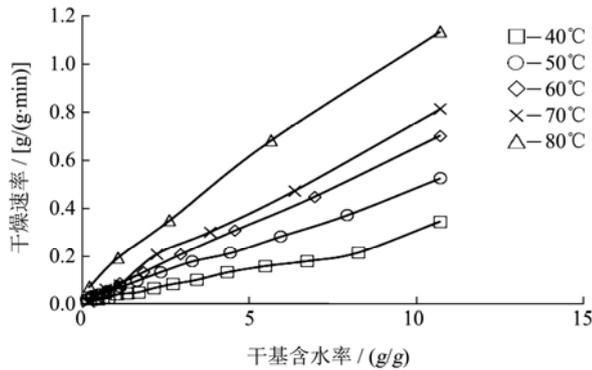


图3 温度变化下干燥速率随干基含水率变化曲线

Fig.3 Curves of drying rate varied with moisture content of dry weight under different infrared radiation temperature

### 2.2 红外线辐照距离对紫甘蓝干燥动力学的影响

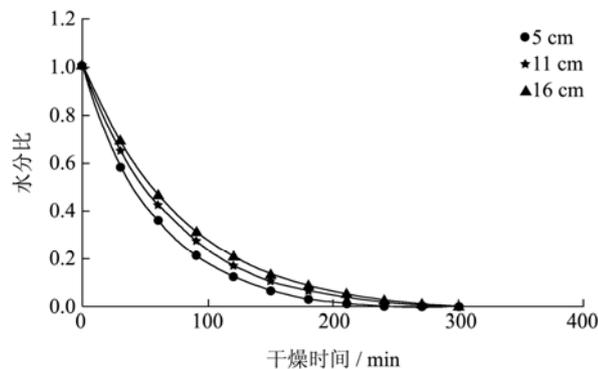


图4 不同辐射距离下水分比随干燥时间变化曲线

Fig.4 Curves of moisture ratio varied with drying time under different infrared radiation distance

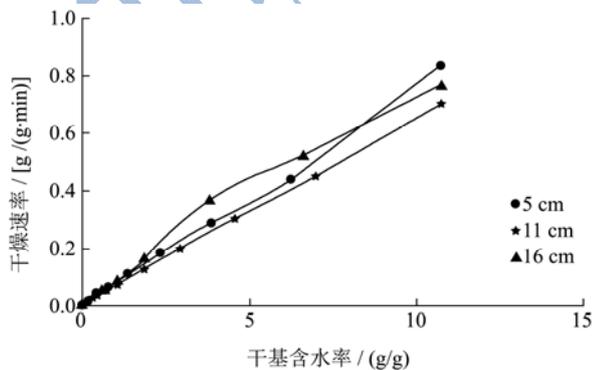


图5 不同辐射距离下干燥速率随干基含水率变化曲线

Fig.5 Curves of drying rate varied with moisture content of dry weight under different infrared radiation distance

保持风速为中速状态,干燥温度取中间值 60 °C,保持辐射功率为 675 W 不变,研究红外辐照距离(5 cm、11 cm、16 cm)对紫甘蓝干燥特性的影响。图4所示的是不同红外辐照距离下的紫甘蓝水分比关于时间的变化曲线。由图可知,当干燥时间一定时,随着红外干燥距离减少,紫甘蓝水分比就越少,最短辐射距离 5 cm 对应的干燥时间比最长的辐射距离 16 cm 的干燥时间加快约 60 min。

图5所示的是不同红外辐射距离下,紫甘蓝干基含水率与干燥速率之间关系的曲线。由图可知,随着干燥过程的不断进行,干基含水率不断降低,干燥速率也不断降低,但是总体来说,红外辐射距离对干燥速率与干基含水率之间的函数关系,影响很小。张丽丽等人<sup>[18]</sup>采用红外辐射干燥方式对胡萝卜切片进行干燥处理,研究了不同容积密度下的红外辐射距离与含水量的变化关系,当物料容积密度较低( $\leq 1000 \text{ kg/m}^3$ )时,不难发现,红外辐射距离对含水率的影响较小。本论文研究的物料是紫甘蓝,其水分较大,储藏在内部孔隙中,视在体积较大,对应的容积密度较低,一般鲜蔬菜的密度约为  $230 \text{ kg/m}^3$ ,在较低容积密度前提下,则红外辐射距离对其干燥特性的影响不大。

### 2.3 红外辐射功率对紫甘蓝干燥动力学的影响

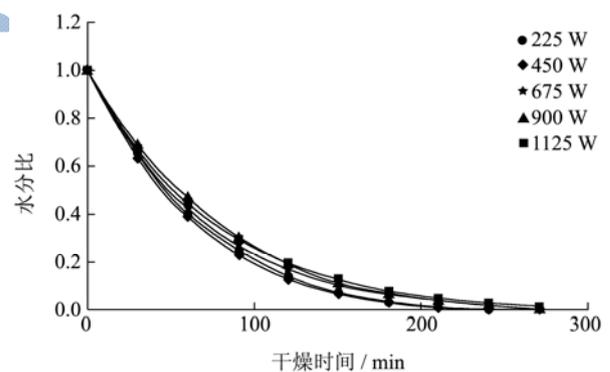


图6 不同辐射功率下水分比随干燥时间变化曲线

Fig.6 Curves of moisture rate varied with drying time under different infrared radiation power

保持风速为中速状态,干燥温度取中间值 60 °C,辐照距离保持中层不变,研究红外干燥的辐射功率(225 W、450 W、675 W、900 W、1125 W)对紫甘蓝干燥特性的影响,得到不同辐照功率下紫甘蓝的水分比关于时间的变化曲线如图6所示。由图可知,最小功率 225 W 的干燥时间比最大功率 1125 W 的干燥时间要短。这主要是因为干燥试验过程中每隔半个小时需打开干燥室舱门,进行称重,舱门开关期间,干燥

室内的温度会有损失，关上门后需要重新加热直至设定的温度，功率大的辐照的时间会减少，所以可能导致了实验出现的结果。这也从侧面反映了红外辐射对干燥速率的影响要大于热空气的。但是不同的红外干燥功率大小对水分比差别不大。

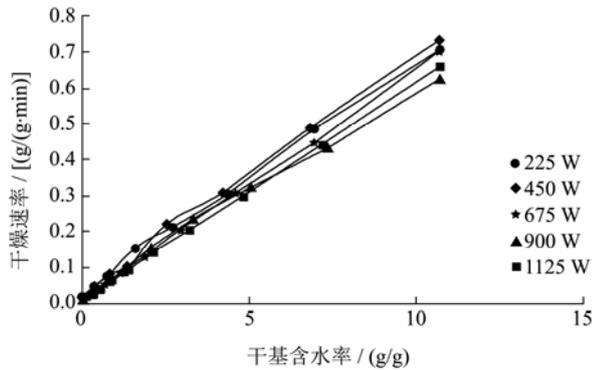


图7 不同辐射功率下干燥速率随干基含水率变化曲线

Fig.7 Curves of drying rate varied with moisture content of dry weight under different infrared radiation power

不同红外辐照强度下，紫甘蓝干基含水率和干燥速率关系之间的关系曲线如图7所示。由图可知，随着干燥过程的不断进行，干基含水率的不断降低，干燥速率也不断降低，但是红外干燥功率的大小对干燥速率几乎没有差别。可能是因为在一定的红外辐射功率范围内，由于红外波长较长，能够快速渗透到紫甘蓝内部，物料温度升温快，干燥失水显著，干燥过程短暂；又由于紫甘蓝在预处理过程中进行了条状处理，单个条状紫甘蓝水分有限，使得在快速的干燥过程中来不及辨别红外辐射功率的作用大小，造成红外辐射功率对紫甘蓝干燥动力学影响较小的表象。

#### 2.4 风速对紫甘蓝干燥动力学的影响

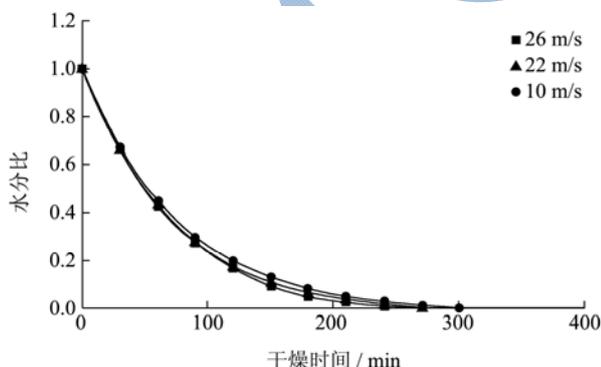


图8 不同风速条件下水分比随干燥时间变化曲线

Fig.8 Curves of moisture rate varied with drying time under different air speed

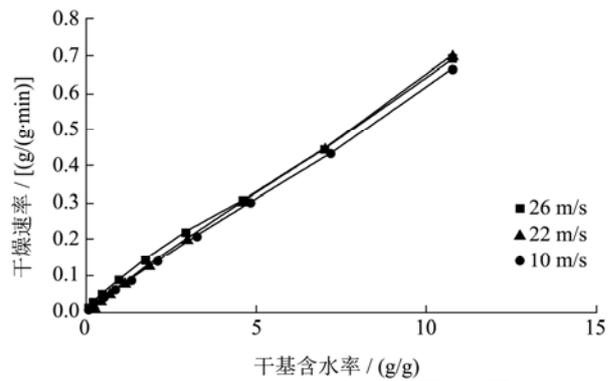


图9 不同风速条件下干燥速率随干基含水率变化曲线

Fig.9 Curves of drying rate varied with moisture content of dry weight under different air speed

保持红外辐射功率为 675 W，干燥温度设为 60 °C，辐照距离保持中层不变，改变干燥时的风速(26 m/s、20 m/s 和 10 m/s)，测量紫甘蓝的干燥特性。不同风速下，紫甘蓝的水分比关于时间的变化曲线如图8所示，干基含水率和干燥速率之间的关系曲线如图9所示。

由图可知，风速 26 m/s 干燥时需要 240 min 左右，可以获得干制品，风速 10 m/s 干燥时需要 300 min 可以获得干制品。由图9可以看出，随着干燥过程的不断进行，干基含水率的不断降低，干燥速率也不断降低。总体而言，风速大小对紫甘蓝的水分比和干燥速率影响不大。该结果正好与上述结论相符，即红外辐射干燥方式对干燥特性的影响大于空气流动(见 2.3 节)，说明红外干燥方式的主要效果取决于红外干燥温度，而干燥温度的高低则与物料内部红外的渗透程度有关，再与水分迁移过程结合，共同影响紫甘蓝的干燥效果<sup>[18,19]</sup>。

#### 2.5 复水率分析

基于上述的研究基础，进一步通过紫甘蓝复水率来选择最佳红外干燥参数。从图10可以看出紫甘蓝的复水率随着干燥温度的升高而逐步递升，干燥温度为 50 °C、60 °C、70 °C 和 80 °C 的复水率分别为 3.03、3.49、3.75 和 4.1。当干燥温度为 80 °C 的时候，复水率最好。主要是因为温度高的话，能增加细胞膜的通透性，有利于水分的迁移和扩散，可以加快物料的干燥速率<sup>[20]</sup>。但是温度也不能一味地增加，因为干燥温度过高，会影响紫甘蓝等果蔬的感官品质，甚至会出现耗能问题<sup>[19]</sup>，因此选择 60 °C 作为紫甘蓝的干燥温度。

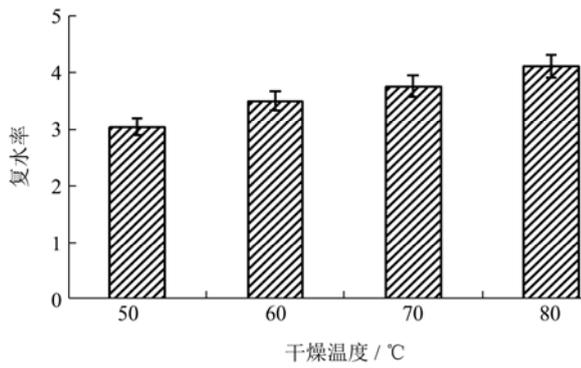


图 10 干燥温度对紫甘蓝复水率的影响

Fig.10 Effects of drying temperature on the rehydration rate of purple cabbage

注: 其它工艺参数为红外功率为 675 W、辐射距离为 11 cm、风速为 20 m/s。

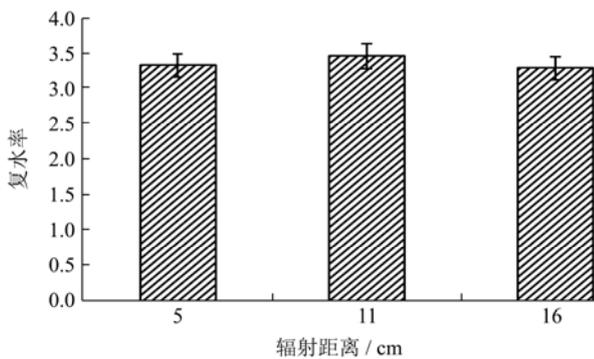


图 11 辐射距离对紫甘蓝复水率的影响

Fig.11 Effects of radiation distance on the rehydration rate of purple cabbage

注: 其它参数为红外功率为 675 W、干燥温度为 60 °C、风速为 20 m/s。

由图 11 可知, 当红外辐射距离为 11 cm 时, 紫甘蓝的复水率最佳, 为 3.49; 距离为 5 cm 时, 复水率次之, 为 3.35; 当距离为 16 cm 时, 复水率为 3.31。

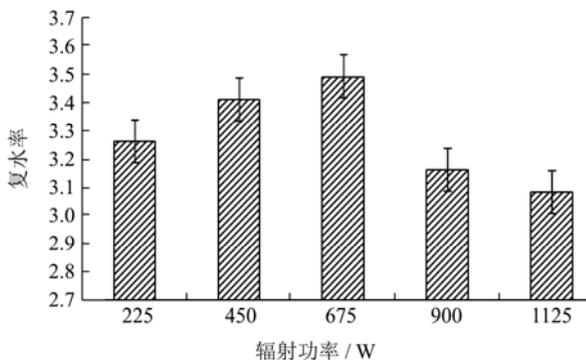


图 12 红外辐射功率对紫甘蓝复水率的影响

Fig.12 Effects of infrared power on the rehydration rate of purple cabbage

注: 其它工艺参数为干燥温度 60 °C、辐射距离 11 cm、风速 20 m/s。

由图 12 可知, 功率为 225 W、450 W、675 W、900 W、1125 W 的复水率分别为 3.26、3.41、3.49、3.16 和 3.08。当辐射功率为 675 W 的时候, 紫甘蓝的复水率最好。在红外辐射功率小于 675 W 时, 复水率随着红外功率的增加而增加; 当红外功率强度大于 675 W 的时候, 复水率随着红外功率的增加而减少。

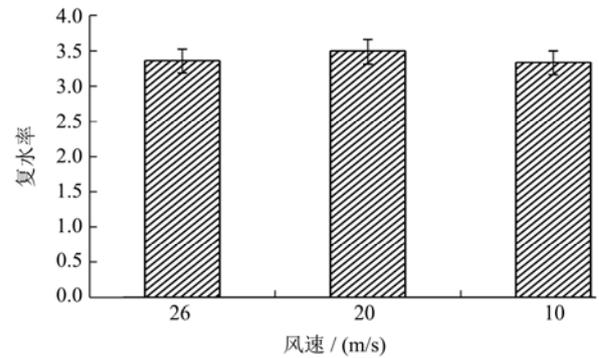


图 13 风速对紫甘蓝复水率的影响

Fig.13 Effects of air speed on the rehydration rate of purple cabbage

注: 其它工艺参数为干燥温度为 60 °C、红外强度为 675 W、辐射距离为 11 cm。

由图 13 可以看出 26 m/s、20 m/s 和 10 m/s 干燥条件下的紫甘蓝样品对应的复水率分别是 3.36、3.49 和 3.33。复水率最高的是风速为 20 m/s 干燥条件下得到紫甘蓝干燥样品。从误差线可以看出风速对紫甘蓝复水率影响很小。

对比分析图 11、图 12 和图 13 可以发现, 红外辐射距离、辐射功率和风速过大或者过小, 紫甘蓝的复水率都达不到最佳状态, 只有选择适合紫甘蓝进行红外辐射的一组干燥参数, 才能够获得最高复水率。物料的复水性与其结构密切相关, 若红外干燥参数过小, 紫甘蓝得不到彻底地干燥, 水分不能很好地迁移出来, 就无法进一步吸水, 复水率低; 相对应地, 若红外干燥参数过大, 会使紫甘蓝结构发生较大变化, 如细胞和毛细管萎缩变形, 甚至是孔隙塌陷, 同样影响其复水能力<sup>[21]</sup>。最终选择选择 11 cm 作为红外辐射距离、675 W 作为辐射功率以及 20 m/s 作为干燥风速。

## 2.6 色泽分析

色泽是干制品品质的主要指标之一, 对于干制品来说是一个重要的感官品质<sup>[22-24]</sup>, 通过对色泽进行分析, 能够反映出干燥参数的作用影响力。徐明月等人<sup>[21]</sup>对橘皮干燥过程中的色泽变化进行研究, 发现干燥温度和持续的干燥时间会让橘皮产生美拉德等非酶褐变、酚类物质酶促褐变等一系列反应, 导致其色泽变化。

表 1 红外干燥参数对色泽的影响

Table 1 Effects of infrared drying parameter on the color of purple cabbage

温度/°C	距离/cm	功率/W	风速/(m/s)	L*	C*	H*
50	11	675	20	56.03±2.58 <sup>a</sup>	5.88±0.16 <sup>a</sup>	361.92±6.55 <sup>a</sup>
60	11	675	20	60.73±1.74 <sup>b</sup>	6.30±0.23 <sup>b</sup>	354.17±10.38 <sup>b</sup>
70	11	675	20	62.96±1.66 <sup>b</sup>	6.47±0.23 <sup>b</sup>	359.67±1.71 <sup>c</sup>
80	11	675	20	62.94±0.83 <sup>b</sup>	6.58±0.25 <sup>b</sup>	354.64±0.83 <sup>d</sup>
60	11	225	20	60.80±0.54 <sup>c</sup>	7.78±0.28 <sup>c</sup>	330.57±0.19 <sup>e</sup>
60	11	450	20	60.33±0.38 <sup>c</sup>	6.67±0.50 <sup>d</sup>	335.74±7.46 <sup>f</sup>
60	11	900	20	62.275±0.06 <sup>c</sup>	5.48±0.38 <sup>e</sup>	382.36±0.66 <sup>g</sup>
60	11	1125	20	58.493±2.01 <sup>d</sup>	4.58±0.43 <sup>f</sup>	372.61±0.81 <sup>h</sup>
60	11	675	26	62.74±1.42 <sup>f</sup>	6.95±0.75 <sup>f</sup>	336.59±7.67 <sup>i</sup>
60	11	675	10	62.01±1.11 <sup>f</sup>	7.28±0.46 <sup>f</sup>	328.39±2.38 <sup>i</sup>
60	5	675	20	62.54±0.02 <sup>g</sup>	8.01±0.02 <sup>g</sup>	340.03±0.27 <sup>j</sup>
60	16	675	20	57.84±0.10 <sup>h</sup>	5.55±0.03 <sup>h</sup>	354.88±1.19 <sup>k</sup>

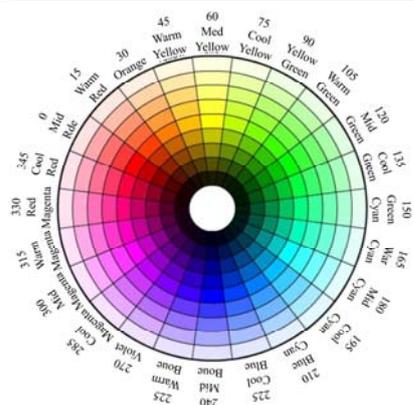


图 14 色彩图

Fig.14 Color map

本文将分光测色仪测得的 L\*、a\* 和 b\* 值, 用 Open RGB 转化为 L\*、C\* 和 H\* 值, 并通过 SPSS 软件进行分析, 如图 14 和表 1 所示, 将其中的 H\* 值与色彩图对比, 确定红外干燥对紫甘蓝色泽的影响。规定 H\* 值在 300~345 的范围内时, 紫甘蓝干制品的色泽较好, 同时比较数据的均值、均方差和差异显著性。通过对比发现, 温度对紫甘蓝色泽影响较大, H\* 值都在 345 以上, 样品的色泽偏红色。红外辐射距离对紫甘蓝色泽不大, 测得的 H\* 也在 350 左右, 基本上也在紫色区域内。红外辐射功率对紫甘蓝色泽的影响不大, H\* 值基本上都在 300~345 之间, 有两组数据已经达到了红色区域, 不同红外辐射功率处理后色泽差异显著。风速对紫甘蓝色泽影响很小, 测得的数据都在紫色区域内。对比各种影响干燥特性的因素, 得出对紫甘蓝色泽影响最大的因素是干燥温度, 符合上述干燥动力学的研究结果, 且由于红外干燥加热速率较快, 紫甘蓝色泽能保持较优状态。

### 3 结论

本文利用控温的红外干燥设备对紫甘蓝进行干燥, 研究了不同干燥温度(40 °C、50 °C、60 °C、70 °C 和 80 °C)、不同红外辐射距离(5 cm、11 cm 和 16 cm)、不同红外辐射功率(225 W、450 W、675 W、900 W 和 1125 W)以及不同风速(10 m/s、20 m/s、26 m/s)对紫甘蓝的干燥速率、复水率和褐变程度的影响, 比较它们的复水率和色泽变化程度, 得出以下结论:

3.1 不同干燥温度对紫甘蓝的干燥速率影响较大, 干燥温度越高, 紫甘蓝干燥速率越快, 呈降速干燥, 整个过程中无恒速干燥阶段。温度设置不同, 但是紫甘蓝样品的复水率趋势类似, 对色泽影响也不大。结合考虑温度和能耗的关系, 选择中间温度 60 °C 作为干燥温度。

3.2 不同干燥温度和辐射功率对样品的复水率影响较大, 随着温度的升高, 复水率增加; 当辐射功率为 675 W, 紫甘蓝的复水率最好。红外辐射距离和风速对样品干燥速率和复水率影响不大, 综合考虑, 选择 11 cm 作为红外辐射距离、675 W 作为辐射功率以及 20 m/s 作为干燥风速。

### 参考文献

[1] Rajkumar G, Shanmugam S, Galvão M D S, et al. Comparative evaluation of physical properties and volatiles profile of cabbages subjected to hot air and freeze drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 501-509

[2] Dong W J, Hu R S, CHU Z, et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition,

- [3] and volatile profile of robusta coffee beans [J]. Food Chemistry, 2017, 234: 121-130
- [4] Choi Y S, Ku S K, Park J D, et al. Effects of drying condition and binding agent on the quality characteristics of ground dried-pork meat products [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(5): 597-603
- [5] Kim H S, Chin K B. Effects of drying temperature on antioxidant activities of tomato powder and storage stability of pork patties [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2016, 36: 51-60
- [6] Deng Y, Luo Y L, Wang Y G, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 168-176
- [7] Wojdylo A, Figiel A, Legua P, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method [J]. Food Chemistry, 2016, 207: 170-179
- [8] Adak N, Heybeli N, Ertekin C. Infrared drying of strawberry [J]. Food Chemistry, 2017, 219: 109-116
- [9] Panyoyai N, Bannikova A, Small D M, et al. Diffusion of nicotinic acid in spray-dried capsules of whey protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 811-819
- [10] Ashtiani S H M, Salarikia A, Golzarian M R. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments [J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(2): 128-139
- [11] Oh S, Ramachandraiah K, Hong G P. Effects of pulsed infrared radiation followed by hot-press drying on the properties of mashed sweet potato chips [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 66-71
- [12] 白峻文. 无核白葡萄干燥动力学及防褐变机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014  
BAI Jun-wen. Drying kinetics and anti-browning mechanism of Thompson seedless grapes [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [13] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 82-87  
LIU Yan, DUAN Zhen-hua, TANG Xiao-xian, et al. Hot-air Drying characteristics and kinetics model of *Malus domeri* (Bois) Chev. slices [J]. The Food Industry, 2017, 38(3): 82-87
- [14] Ng M X, Tham T C, Ong S P, et al. Drying kinetics of technical specified rubber [J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(1): 64-71
- [15] Doymaz I. Suitability of thin-layer drying models for infrared drying of peach slices [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(6): 2232-2239
- [16] 许牡丹, 马可纯, 黄萌, 等. 猕猴桃片真空-红外联合干燥数学模型建立[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 127-132  
XU Mu-dan, MA Ke-chun, HUANG Meng, et al. Modeling of the combination of vacuum and infrared drying of kiwifruit slices [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(18): 127-132
- [17] 吕为乔, 韩清华, 李树君, 等. 微波流态化干燥姜片复水能力和物性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 200-205  
LV Wei-qiao, HAN Qing-hua, LI Shu-jun, et al. Rehydration capacity and physical properties of ginger slices dried by microwave fluidization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 200-205
- [18] 方蕾, 吕明哲, 曾凯欣, 等. 番木瓜的自身特性及干燥温度对干燥特性的影响研究[J]. 广东化工, 2016, 43(1): 33-35  
FANG Lei, LV Ming-zhe, ZENG Kai-xin, et al. Study on characteristics of papaya during hot-air drying in the features and different temperature [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(1): 33-35
- [19] 张丽丽, 王相友, 魏忠彩, 等. 红外辐射干燥胡萝卜切片结构特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 246-251  
ZHANG Li-li, WANG Xiang-you, WEI Zhong-cai, et al. Structural properties research of infrared radiation drying for carrot slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 246-251
- [20] 张鹏飞, 吕健, 周林燕, 等. 桃片超声渗透-红外辐射干燥特性及能耗研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(11): 234-241  
ZHANG Peng-fei, LV Jian, ZHOU Lin-yan, et al. Drying characteristics and energy consumption of peach slices during ultrasound-assisted osmotic dehydration in combination with infrared radiation [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(11): 234-241
- [21] Xu F F, Jin X, Zhang L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods [J]. Food Research International, 2017, 96: 191-197
- [22] 徐明月, 钟耀广, 毕金峰, 等. 干燥条件对橘皮颜色与结构性能的影响[J]. 2016, 32(8): 197-204  
XU Ming-yue, ZHONG Yao-guang, BI Jin-feng, et al. Effect of different drying conditions on color and texture of citrus peels [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 197-204
- [23] Zielinska M, Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics,

- polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 671-680
- [24] Chen Q Q, Li Z L, Bi J F, et al. Effect of hybrid drying methods on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of dried black mulberry [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 178-184
- [25] Horuz E, Bozkurt H, Karataş H, et al. Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 295-305

现代食品科技