

# 香葱分段式变温催化红外干燥的特性及品质研究

王蓓, 赵兴, 马海乐, 周存山, 曲文娟

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏省食品物理加工重点实验室, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 为提高脱水香葱品质、缩短干燥时间、降低能耗, 本研究采取了红外分段式变温加热技术。利用单板和双板进行高温加低温结合的工艺, 对香葱不同干燥模式下干燥特性、色泽和复水比进行研究。研究表明, 单板模式下第一阶段80、90 ℃分别处理12、6 min能够去大量水分, 水分比分别降至0.38和0.12, 第二阶段的低温干燥60、70 ℃干燥速率没有明显区别, 总干燥时间为17~18 min。双板组合条件下, 第一阶段60~90 ℃在2~3.5 min能够快速去除约一半水分, 第二阶段温度为70 ℃组总干燥时间为19~23 min, 60 ℃总干燥时间为27~29 min。组合干燥模式解决了干燥过程中因高温而造成的色泽焦变的现象。通过对比不同组合干燥后香葱的色泽变化和复水比可以看出, 经单板+单板的变温组合处理的产品具有较高的复水比, 而双板+单板的变温组处理的产品够具有较优的色泽。

**关键词:** 红外; 干燥; 香葱; 色泽; 复水比

文章编号: 1673-9078(2019)11-132-137

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.019

## Characteristics and Quality of Chinese Chives Dried by A Temperature-segmented Catalytic Infrared System

WANG Bei, ZHAO Xing, MA Hai-le, ZHOU Cun-shan, QU Wen-juan

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Provincial Key Laboratory for Food Physical Processing, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To improve the quality of dehydrated Chinese chives, shorten the drying time and reduce energy consumption, temperature-segmented infrared heating technology was adopted in this research. The drying characteristics, color and rehydration ratio of chives dried by different methods were studied *via* the combination of high temperature and low temperature using single- and double- plates. The results showed that a large amount of water were removed in the first stage of single-plate drying mode at 80 ℃ for 12 min and 90 ℃ for 6 min, respectively, with the water ratio down to 0.38 and 0.12 respectively. In the second stage, no significant difference in the drying rate for the low-temperature drying at 60 and 70 ℃, with the total drying time ranging in 17~18 min. In the double-plate mode, about half of the moisture was removed quickly in the first stage of drying at 60~90 ℃ for 2~3.5 min, while the second stage of drying was performed at 70 ℃ for 19~23 min or at 60 ℃ for 27~29 min. The combined drying mode eliminated color darkening caused by high-temperature drying. By comparing the color change and rehydration ratio of chives dried by different combinations of processes, one may conclude that the dehydrated chive product treated by single-single temperature variable drying mode had a higher rehydration ratio, while the product treated by double-single temperature variable drying modes had a better color.

**Key words:** infrared radiation; drying; chives; color; rehydration ratio

脱水干燥是香葱加工的一个重要方式, 香葱经脱水后, 水分含量和水分活度降低, 使微生物和酶处于

收稿日期: 2019-03-18

基金项目: 江苏省重点国别及机构产业技术合作项目 (BZ2017034); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0400705-04); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31601516); 江苏大学高级人才科研启动基金项目 (16JDG048); 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: 王蓓 (1985-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品物理加工技术

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

受抑制的状态, 产品真空或密封保存可长达 2~3 年<sup>[1]</sup>。因其使用方便, 储存时间长, 广泛用于调味品行业, 是我国重要的出口脱水蔬菜之一<sup>[2]</sup>。江苏兴化是我国香葱主要生产基地, 年加工脱水香葱 2.4 万 t, 销售收入达 4 亿元, 出口比占世界 80%<sup>[3]</sup>。

目前脱水香葱加工方式主要采用热风干燥及真空冻干技术, 热风干燥利用 80 ℃ 以上的热风对新鲜香葱进行烘干, 处理量大、设备简单, 然而热风干燥所需时间长达数小时, 能耗高、产品复水性差、色泽暗、口感差、品质低。真空冻干是将新鲜香葱冷冻结冰, 然后在真空下使冰升华而去除水分, 该方式生产的产

品色泽好,但经济成本高,且对香葱固有的香味破坏较大。

催化式红外辐射是近年来新兴的蔬菜脱水干燥技术,其主要利用天然气代替电能,利用红外辐射对物料进行加热以达到脱水干燥的目的<sup>[4]</sup>。具有热效率高、节能环保、设备简单等优点,课题组就该技术对果蔬脱水干燥展开了大量实验,并取得了显著的效果<sup>[5-8]</sup>。在香葱干燥方面,前期研究了在单一红外加热板(单板)和上下双加热板(双板)模式下催化式红外干燥香葱的干燥特性<sup>[9]</sup>。实验过程中发现,由于香葱叶片较薄,而红外温度较高,因此加热时易受热不均,部分香葱表面会因过热而产生焦变褐变等现象。在双板模式下干燥强度大,因此时间短,速率快,但干燥后香葱的色泽损失严重;在单板条件下,若采用 80、90 °C 等较高温度处理时,香葱的色泽受损严重, Vc 含量和复水比低,而 60 °C 等较低温度处理时干燥时间长,色泽损失大。因此单一模式单一温度的加热方式具有一定的局限性。

目前的工厂中采用两段热风以高低温组合方式进行香葱干燥,第一阶段,热风温度为 90~100 °C,干燥时间 1~1.5 h,第二阶段,温度为 65~85 °C,干燥时间 2~2.5 h。当香葱的水分含量小于 8% 时,干燥结束。整个干燥过程持续时间为 3~5 h。分段控制干燥温度,能够提高干燥效率,改善产品品质<sup>[10]</sup>。利用热风、微波等加热技术进行分段控温干燥在果蔬等农产品的应用已有报道<sup>[11-13]</sup>,然而利用催化式红外辐射对香葱进行分段控温干燥的研究较少。本文将以前述减菌处理后的香葱为对象,分别采用红外单板模式和双板模式下先高温后低温的分段式变温红外干燥的方法,研究其对香葱干燥特性及品质的影响,探索适合香葱干燥的生产工艺,为工业生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

香葱(水分含量 91%)购于当地农贸市场,要求无机械损伤、无虫害。在 4 °C 冰箱储藏。

### 1.2 主要仪器与设备

BAS 2202S 天平, Sartorius 德国; TM 350 手持式红外测温仪, Tecmen 电子有限公司; 色差仪 NH 310, 深圳三恩驰科技有限公司。

催化式红外干燥机, 镇江美博红外科技有限公司; 该机红外板大小为 600×1800 cm, 进口高度可调, 板温可达 450±20 °C, 托盘大小为 260×600 cm。设备结

构详见<sup>[9]</sup>。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 原料减菌预处理

实验前将香葱从冷藏室中取出,放至室温(25 °C)待用。经挑选,除去杂质、残叶,切除根须,清洗并切成长度为 1 cm 的葱段,置于通风处沥干其表面水分。干燥前需要对香葱进行减菌预处理。采用催化式红外辐射进行预处理:在双板模式下加热 60 °C 处理 1 min,所得香葱湿基含水率为 85%,将处理后的香葱作为本实验的原材料。

#### 1.3.2 干燥实验

将 150 g 经减菌预处理的香葱均匀单层平铺于金属网制托盘上,称取其初始质量,开启催化式红外设备,当设备温度(395±5 °C)稳定后,将托盘放入两个加热板之间。采用单板(上板)加热时,加热板与样品距离为 25、15、8、4 cm 对应香葱表面温度分别为 60、70、80、90 °C。双板加热时,距离为 36、30、26、20 cm,对应香葱表面温度分别为 60、70、80、90 °C。

预实验采用单因素实验考察了切换点对两段式联合干燥过程和干燥质量的影响,得出第一阶段加热条件为:单板 80、90 °C 分别加热 12.0、6.0 min;双板 60、70、80、90 °C 分别加热 3.5、3.0、2.5、2.0 min。结束后将样品分别置于单板 60 °C、70 °C 条件下进行第二阶段干燥,每隔 1 min 取出托盘,记录每分钟香葱的重量变化和色泽变化,当香葱含水量降至安全水分(8%)时干燥结束。每个操作重复三次。

#### 1.3.3 香葱温度和水分的测定

使用手持式红外测温仪测定香葱的表面温度,取多次测量的平均值。

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

#### 1.3.4 颜色测定

采用色差仪测定香葱表面颜色。由于香葱不同部位,不同个体表面色泽差异大,为了保证测量的准确性,在测量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,实验选用 Lab 表色系统<sup>[14]</sup>。

#### 1.3.5 物料水分比和干燥速率

物料水分比的计算公式为:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (1)$$

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)。 $m_0$ 、 $m_e$  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  $m_0$  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所示:

$$MR = \frac{m_t}{m_0} \quad (2)$$

干燥速率计算公式如下:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中:  $t_1$ 、 $t_2$  为干燥时间 (min),  $M_{t1}$ 、 $M_{t2}$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$  时间时的水分比。

### 1.3.6 复水率测定

将实验结束后的香葱干制品放入室温 25 °C<sup>[14]</sup>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。复水比按下式计算:

$$\text{复水比} = \frac{\text{复水后重量}}{\text{复水前重量}} \quad (4)$$

### 1.3.7 数据统计分析

实验数据利用 SPSS 17.0 数据统计分析软件对实验数据进行显著性分析不同干燥方法间的指标均值进行 Duncan 多范围检验, 当  $p < 0.05$  时, 均值被视为显著差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单板模式变温组合条件下香葱红外干燥

单板模式在先高温后低温组合条件下香葱干燥曲线和干燥速率曲线见图 1。第一阶段 90 °C 干燥 6min 后, 水分比为 0.38; 80 °C 干燥 12 min 后, 水分比为 0.12, 第一阶段可去除 62%~88% 的水分。图 1a 中第一段加热时, 物料的水分比 90 °C 组比 80 °C 组降低快, 随着第二段加热开始, 四种组合的物料水分在 10~11 min 时曲线接近一致。第二阶段干燥温度在 60 °C 和 70 °C 对水分比影响的差异不显著。四种组合

干燥条件所需时间在 17~18 min。

由图 1b 可知, 90 °C 组合的第一阶段干燥速率高于 80 °C 组合的干燥速率, 第二阶段干燥速率低于 80 °C 组合的干燥速率。第二阶段干燥温度在 60 °C 和 70 °C 对干燥速率影响的差异不显著。这是由于高温使水分快速散失, 温度高干燥速率快, 随着干基含水率的降低, 干燥过程中发生传质变化, 第一阶段的高温使香葱表面孔隙率变小, 所以在第二阶段换用温度更低的 60、70 °C 进行干燥, 干燥速率并没有因为温度区别而呈现明显区别。

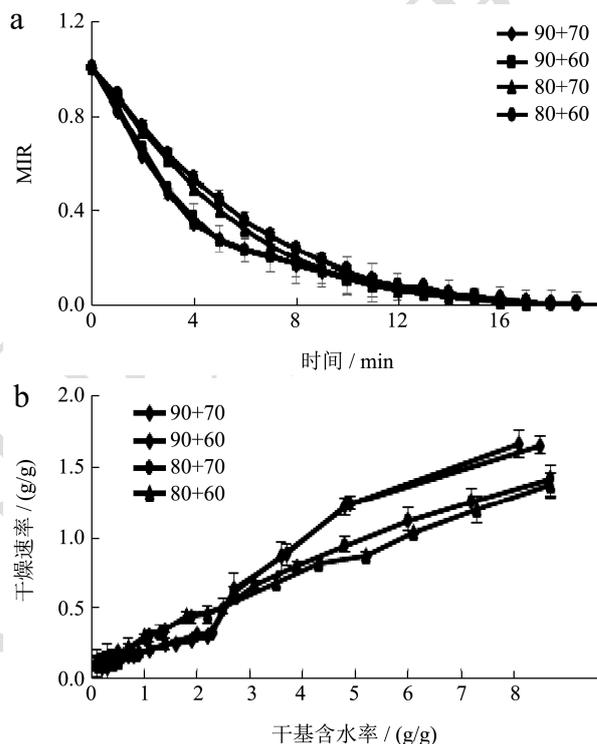


图1 单板变温组合条件下香葱红外干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.1 The infrared drying rate of chives on single-double combination

注: a. 干燥曲线; b. 干燥速率曲线。

表1 单板模式下干燥产品的色泽和复水比

Table 1 Color and rehydration ratio of dried products in single-plate mode

组合模式	温度/°C	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$	复水比
减菌处理后香葱	/	30.16±0.89 <sup>a</sup>	-12.53±1.23 <sup>a</sup>	18.88±0.78 <sup>a</sup>	/	/
单板+单板	80+60	30.38±1.21 <sup>a</sup>	-12.29±1.32 <sup>a</sup>	16.56±1.40 <sup>a</sup>	2.34±2.27 <sup>a</sup>	4.6±0.66 <sup>a</sup>
	80+70	31.97±0.63 <sup>a</sup>	-11.93±0.80 <sup>a</sup>	17.69±0.85 <sup>a</sup>	3.24±1.32 <sup>a</sup>	5.0±0.37 <sup>a</sup>
	90+60	32.95±0.78 <sup>a</sup>	-12.68±0.54 <sup>a</sup>	17.83±0.88 <sup>a</sup>	2.98±1.29 <sup>a</sup>	4.4±0.84 <sup>a</sup>
	90+70	29.88±1.12 <sup>a</sup>	-11.93±1.04 <sup>a</sup>	16.59±1.36 <sup>a</sup>	2.38±2.04 <sup>a</sup>	5.5±0.32 <sup>a</sup>

注: 同列数据中不同字母代表同一条件差异显著 ( $p < 0.05$ )。

由表 1 可知, 单板变温干燥前后色泽无显著性差异,  $\Delta E$  在 2.34~4.24 之间。单板组合干燥的复水比较高, 在 4.4~5.5 之间, 这是由于干燥时间较短, 未对结构造成破坏。利用红外单板变温干燥后香葱的复水

比与微波干燥、热风干燥及真空干燥的香葱接近。代小梅等<sup>[15]</sup>报道 80 °C 热风干燥后香葱复水比约为 5, 80 °C 真空干燥后香葱复水比约为 6, 李涛等<sup>[16]</sup>报道微波干燥后香葱复水比约为 5.2。然而本文中红外干燥较

3.5 h 热风干燥及 4 h 真空干燥<sup>[15]</sup>所需时间显著缩短。

综合考虑选取较小色泽变化, 较大的复水比作为合适的组合模式, 所以较优的组合模式为单 90 °C+单 70 °C。

### 2.2 双板模式变温组合条件下香葱红外干燥

双板模式变温组合条件下香葱红外干燥曲线和干燥速率如图 2 所示。可以看出, 温度越高, 水分散失越快。在图 2a 中, 在双板 60、70、80、90 °C 下, 第一段干燥中物料水分比迅速下降, 结束时物料的水分比分别为 0.46、0.39、0.48、0.48, 失去接近一半的水分。温度越高, 产生的温差就越大, 传热传质动力越大<sup>[17]</sup>。在第二阶段 70 °C 低温干燥过程中水分比缓慢下降至终点。两段干燥所需总时间分别为 23、19、20、23 min。在图 2b 中, 双板温度为 60、70、80、90 °C+单板 60 °C 组合干燥达到终点时所需干燥时间分别为 29、28、28、27 min。第一阶段条件相同, 主要由于第二阶段温度较低, 因此所需总时间较长。

干燥速率方面, 由图 2c 中可知, 第一阶段干燥速率较快, 且温度越高, 速率越快, 第一阶段干燥结束后, 双板 60、70、80、90 °C+单板 70 °C 条件下干基含水率分别为 4.65、3.86、4.76、4.77 g/g。但随着干基含水率的降低, 温度越高, 干燥速率越低。这和红外辐射距离对香葱表面结构的影响有关, 张丽丽<sup>[18]</sup>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, 温度越高, 使得物料表观密度越大, 孔隙率越小, 不利于水分的扩散, 因此 70 °C 时干燥速率反而变大。

双板 60、70、80、90 °C 四种温度+单板 60 °C 组合下干燥速率曲线 (图 2d) 与图 2c 相似, 在第二干燥阶段, 60 °C 温度低, 干燥时间长, 干燥速率较低。

与之前使用红外恒温加热的研究<sup>[9]</sup>相比, 组合所需干燥总时间较短, 这是因为组合干燥时, 前期温度高, 能快速去除水分。而与本研究前文中单板组合相比在, 双板+单板的干燥所需时间较长, 约 2~11 min, 特别是第二阶段 60 °C 干燥, 干燥时间最长可达 29 min。这是因为第一阶段采用双板干燥, 温度高, 强度大, 虽然干燥时间短, 但对香葱细胞组织造成了破坏, 降低了第二阶段干燥速率。

由表 2 所示, 干燥后的香葱  $L^*$  增大, 即亮度增加, 这是由于水分含量逐渐降低, 色泽变得鲜亮。  $a^*$  和  $b^*$  结合显示红外辐射处理后, 样品颜色变绿。  $\Delta E$  较单板变温小, 采用组合干燥的方式, 可有效解决干燥过程中香葱的色泽受损问题, 经过组合干燥后产品的色泽变化小,  $\Delta E$  值在 1.79~3.33 之间。这是由于快速高温

加热能够起到使多酚氧化酶失活的作用, 起到了杀青的效果, 因而没有发生酶促褐变<sup>[19-21]</sup>。

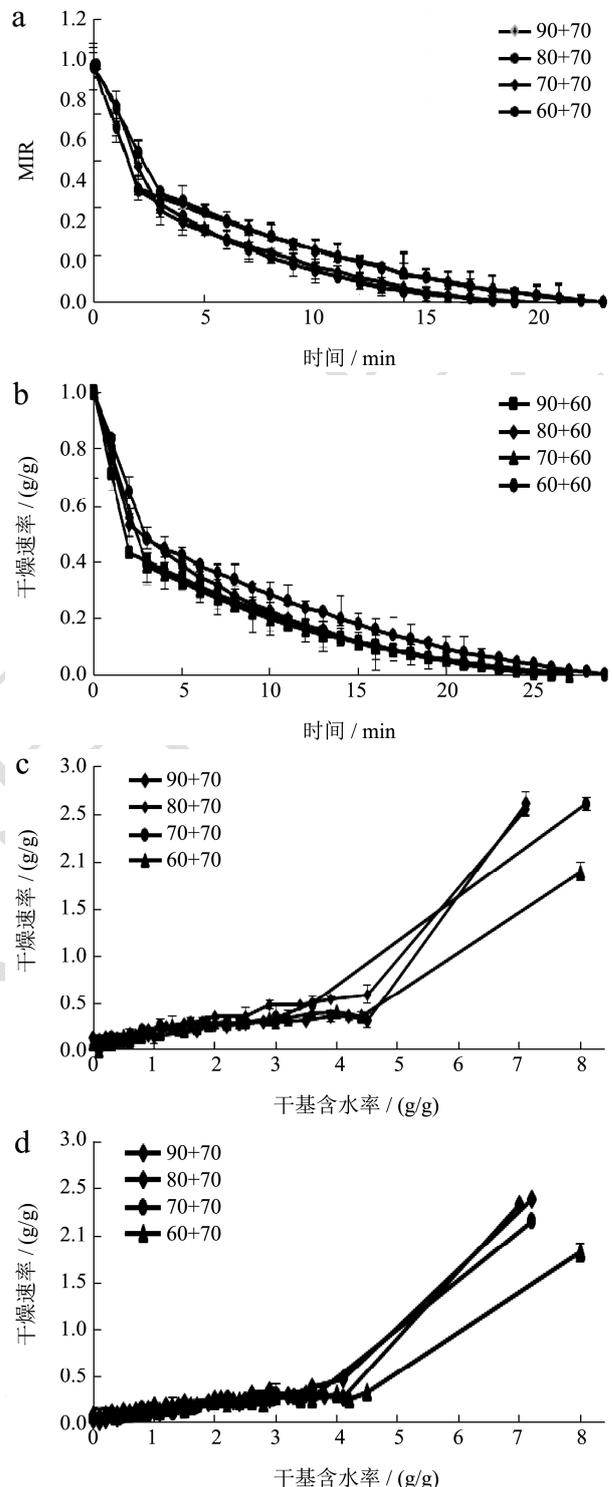


图2 双板变温条件下香葱红外干燥曲线和干燥速率曲线

Fig.2 Drying characteristic curves of Chives Under Double-plate Combination Condition

注: a.双板+单板70 °C干燥曲线; b.双板+单板60 °C干燥曲线; c.双板+单板70 °C干燥速率曲线; d.双板+单板60 °C干燥速率曲线。

表2 不同模式下干燥产品的色泽和复水比

Table 2 Color and rehydration ratio of dried products in different modes

组合模式	温度/°C	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	$\Delta E$	复水率
新鲜香葱		31.59±1.53 <sup>a</sup>	-13.80±0.92 <sup>a</sup>	18.88±1.81 <sup>a</sup>	/	/
双板+单板	60+60	32.35±1.50 <sup>a</sup>	-11.87±1.42 <sup>a</sup>	19.22±1.23 <sup>a</sup>	2.11±2.41 <sup>a</sup>	3.1±0.42 <sup>a</sup>
	70+60	32.12±0.87 <sup>a</sup>	-11.56±0.90 <sup>a</sup>	19.01±0.86 <sup>a</sup>	2.32±1.51 <sup>a</sup>	3.7±0.35 <sup>a</sup>
	80+60	31.73±2.23 <sup>a</sup>	-10.83±1.22 <sup>b</sup>	18.74±1.22 <sup>a</sup>	2.99±2.81 <sup>a</sup>	4.3±0.62 <sup>a</sup>
	90+60	32.19±1.54 <sup>a</sup>	-11.63±0.64 <sup>a</sup>	17.98±0.91 <sup>a</sup>	2.44±1.89 <sup>a</sup>	3.3±0.24 <sup>a</sup>
	60+70	32.06±0.67 <sup>a</sup>	-11.02±1.24 <sup>a</sup>	17.13±1.25 <sup>a</sup>	3.33±1.88 <sup>a</sup>	3.5±0.56 <sup>a</sup>
	70+70	32.40±0.50 <sup>a</sup>	-12.35±0.65 <sup>a</sup>	18.23±0.78 <sup>a</sup>	1.79±1.13 <sup>b</sup>	4.9±0.36 <sup>a</sup>
	80+70	30.93±1.25 <sup>a</sup>	-12.02±0.48 <sup>a</sup>	19.51±1.05 <sup>a</sup>	2.01±1.70 <sup>a</sup>	4.2±0.42 <sup>a</sup>
	90+70	33.91±1.28 <sup>b</sup>	-13.34±0.68 <sup>a</sup>	20.79±1.34 <sup>b</sup>	3.04±1.97 <sup>a</sup>	3.6±0.51 <sup>a</sup>

注: 同列数据中不同字母代表同一条件差异显著 ( $p < 0.05$ )。

双板+单板组合干燥条件下处理的香葱复水比差异较大, 其中双 60 °C+单 60 °C 组合复水比最小为 3.1, 这是由于第一阶段辐射强度大, 第二阶段干燥时间长, 对结构造成了破坏。相比表 1, 单板组合干燥的复水比较好, 在 4.4~5.5 之间。综合考虑选取色泽变化较小、复水比较大的组合模式, 有双 70 °C+70 °C、双 80 °C+70 °C。

### 3 结论

3.1 在单板组合条件下, 第一阶段 90 °C 干燥 6 min、80 °C 干燥 12 min 后, 去除了 62%~88% 的水分。第一阶段 90 °C 组合的干燥速率高于 80 °C 组合, 第二阶段的低温干燥 60、70 °C 干燥速率无明显区别, 总干燥时间为 17~18 min。

3.2 在双板组合条件下, 第一阶段在 2~3.5 min 能够快速去除约一半水分, 第二阶段干燥速率和温度有关, 温度越高, 干燥速率越大, 时间越短, 第二阶段温度为 70 °C 组时干燥时间为 19~23 min, 60 °C 干燥时间为 27~29 min。

3.3 组合干燥模式解决了干燥过程中因高温而造成的色泽焦变迹象。单板+单板的变温组合处理的产品具有较高的复水比, 而双板+单板的变温组合处理的产品具有较优的色泽, 其中单 90 °C+单 70 °C 或双 70 °C+70 °C、双 80 °C+70 °C 均为较适宜的干燥条件。

### 参考文献

[1] 谭宇涛, 陆宁. 真空冷冻干燥和热风干燥对洋葱挥发性成分的影响[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(4): 20-25  
TAN Yu-tao, LU Ning. Effect of vacuum freeze-drying and hot air drying on volatile components of onion [J]. Packaging and Food Machinery, 2010, 28(4): 20-25

[2] 刘艳, 张卫明, 姜洪芳, 等. 兴化脱水香葱产品水分测定方法的探讨[J]. 食品工业科技, 2008, 1: 275-277  
LIU Yan, ZHANG Wei-ming, JIANG Hong-fang, et al. Study on moisture content determination of dehydrated green onion products in Xinghua [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 1: 275-277

[3] 罗鹏. 小葱出口成了大产业兴化脱水香葱写出大“文章”[N/OL]. 中国江苏网, 2017-5-22 (2019-2-15)  
[http://news.jschina.com.cn/focus/201705/t20170522\\_540680.shtml](http://news.jschina.com.cn/focus/201705/t20170522_540680.shtml)

[4] Wang B, Khir R, Pan Z. Effective disinfection of rough rice using infrared radiation heating [J]. Journal of Food Protection, 2014, 77(9): 1538-1545

[5] 白竣文, 肖瑞, 董晨, 等. 山药催化式红外干燥特性及色泽评价[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 221-225  
BAI Jun-wen, XIAO Rui, DONG Chen, et al. Drying characteristic and product color evaluation of yam by catalytic infrared drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 221-225.

[6] Wu B, Ma H, Qu W, et al. Catalytic infrared and hot air dehydration of carrot slices [J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(2): 111-121

[7] Wu B, Pan Z, Qu W, et al. Effect of simultaneous infrared-drying and blanching on quality characteristics of carrot slices [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 90-98

[8] Wang B, Khir R, Pan Z, et al. Simultaneous decontamination and drying of rough rice using combined pulsed light and holding treatment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(8): 2874-2881

[9] 赵兴, 吴本刚, 马海乐, 等. 香葱催化式红外干燥特性及品质研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(9): 182-189

- ZHAO Xing, WU Ben-gang, MA Hai-le, Drying characteristics and quality attributes of Chinese chives by catalyzed infrared drying [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(9): 182-189
- [10] 吴群芳, 苏国成, 周常义. 响应面法设计牡蛎分段式变温热风干燥工艺[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(12): 158-162
- WU Qun-fang, SU Guo-cheng, ZHOU Chang-yi. Response surface methodology for designing oyster segmented variable temperature hot air drying process [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(12): 158-162
- [11] 吴中华, 李文丽, 赵丽娟, 等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 287-293
- WU Zhong-hua, LI Wen-li, ZHAO Li-juan et al. Drying characteristics and product quality of *Lycium barbarum* under stages-varying temperatures drying process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 287-293
- [12] 朱德泉, 马锦, 蒋锐, 等. 山核桃坚果分段变功率微波干燥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 268-274
- ZHU De-quan, MA Jin, JIANG Rui, et al. Parameter optimization of hickory nut drying by phased varying power microwave [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(15): 268-274
- [13] 徐建国, 徐刚, 张森旺, 等. 热泵-热风分段式联合干燥胡萝卜片研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(12): 230-235
- XU Jian-guo, XU Gang, ZHANG Sen-wang, et al. Heat pump and hot air combined drying of carrot slices [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(12): 230-235
- [14] 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(5): 619-628
- [15] 代小梅, 杨性民, 姜丽, 等. 香葱干燥工艺研究[J]. *中国调味品*, 2013, 38(11): 25-30
- DAI Xiao-mei, YANG Xing-min, JIANG Li, et al. Study on the drying technology of Chinese chives [J]. *China Condiment*, 2013, 38(11): 25-30
- [16] 李涛, 姚明印, 刘木华. 香葱微波干燥工艺优化试验研究[J]. *农机化研究*, 2015, 37(3): 211-214, 218
- LI Tao, YAO Ming-yin, LIU Mu-hua. Study on optimization of microwave drying technology of Chinese chives [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(3): 211-214, 218
- [17] 张绪坤, 王高敏, 姚斌, 等. 单粒莲子热风干燥特性及其干燥动力学[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 141-148
- ZHANG Xu-kun, WANG Gao-min, YAO Bin, et al. Drying characteristics and kinetics of individual lotus seeds under hot air drying process [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(4): 141-148
- [18] 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
- [19] 刘美娟, 吴本刚, 潘忠礼, 等. 胡萝卜丁催化式红外干法杀青同步脱水试验及动力学研究[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(1): 55-64
- LIU Mei-juan, WU Ben-gang, PAN Zhong-li, et al. Experiment and kinetics of dehydration and POD in activation of carrot dices by simultaneous catalyze infrared dry-blanching [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(1): 55-64
- [20] 吴本刚, 肖孟超, 刘美娟, 等. 催化式红外杀青对绿茶热风干燥的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 126-132
- WU Ben-gang, XIAO Meng-chao, LIU Mei-juan, et al. Fixation and drying of green tea using sequential catalytic infrared heating and hot air drying [J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 126-132
- [21] Bingol G, Wang B, Zhang A, et al. Comparison of water and infrared blanching methods for processing performance and final product quality of French fries [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121: 135-142