

# 胡萝卜丁预干燥改善复合肉脯感官品质及干燥特性

阮征, 杨兴菊, 李泮生, 李丹丹

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 为解决胡萝卜丁复合肉脯干燥后干裂、胡萝卜丁容易脱落等品质劣化问题, 探讨添加不同预干燥程度的胡萝卜丁对复合肉脯(文中 ND、D70、D50、D30、D10 分别代表添加未干燥及相应水分含量胡萝卜丁的样品)感官品质和干燥特性的影响, 并进行能耗分析。结果表明: 胡萝卜丁预干燥可以改善复合肉脯的外观、口感和组织状态, 显著提高复合肉脯的  $L^*$  值 ( $p < 0.05$ ), 但显著降低  $a^*$  值和  $b^*$  值 ( $p < 0.05$ ), 且胡萝卜丁过度干燥降低复合肉脯的色泽和质地分值。复合肉脯剪切力为 19.36~24.34 kg·sec, 其中  $ND > D10 > D30 > D50 > D70$ 。相关性分析显示复合肉脯干燥时间与胡萝卜丁水分含量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 但各组吸湿等温线变化趋势趋于一致。干燥过程中肉糜和胡萝卜丁之间存在水分差, 胡萝卜丁水分含量下降较肉糜呈现滞后现象。低场核磁共振检测结果显示: 胡萝卜丁的水分较肉糜更难以脱除, 干燥后水分主要集中在样品中心部位的胡萝卜丁中,  $T_2$  值普遍减小, 结合水和不易流动水含量有所增加。胡萝卜丁预干燥可以使复合肉脯的干燥总耗能降低 10.27%~30.47%, 总耗能随胡萝卜丁预干燥程度的增加而减小, 但 D10 与 D30 总耗能差异不显著。

**关键词:** 胡萝卜丁; 预干燥; 复合肉脯; 感官品质; 干燥特性

文章编号: 1673-9078(2021)01-125-133

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.01.0122

## Use of Dry-processed Carrots to Improve the Sensory Quality and Drying Characteristic of Composite Pork Jerky

RUAN Zheng, YANG Xing-ju, LI Bian-sheng, LI Dan-dan

(College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To solve the quality deterioration problems of composite diced carrot-jerky such as over-drying and cracking of composite jerky as well as diced carrot fall-off, the effects of diced carrots pre-dried to different extents (ND, D70, D50, D30 and D10 that represent the samples containing diced carrots without pre-drying (ND) or with different moisture contents: 70%, 50%, 30% and 10%) on the sensory quality and drying characteristics of composite jerky (represents sample with diced carrot without drying), along with the energy consumption, were examined. The results showed that pre-drying of diced carrots improved appearance, mouth feel and tissue structure of composite jerky, increased significantly ( $p < 0.05$ ) the  $L^*$  value of composite jerky, reduced significantly ( $p < 0.05$ ) the  $a^*$  and  $b^*$  values. Excessive drying of diced carrots led to declined color and texture of composite jerky. The shear force of composite jerky ranged from 19.36 to 24.34 kg·s:  $ND > D10 > D30 > D50 > D70$ . Correlation analysis revealed a significant and positive correlation between the drying time of composite jerky and the moisture content of diced carrots ( $p < 0.05$ ), and the same moisture absorption isotherm for all the groups. During the drying process of composite jerky, there was a moisture difference between the minced meat and diced carrots, with the decrease in the moisture content of diced carrots lagging behind that of the minced meat. The low-field nuclear magnetic resonance analysis revealed that the moisture in diced carrots was more difficult to remove than that in meat. After drying, the moisture was mainly concentrated in diced carrot located in the center of composite jerky, with  $T_2$  relaxation time generally decreasing, and the contents of bound water and non-flowing water increasing significantly. Pre-drying of diced

阮征, 杨兴菊, 李泮生, 等. 胡萝卜丁预干燥改善复合肉脯感官品质及干燥特性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 125-133

RUAN Zheng, YANG Xing-ju, LI Bian-sheng, et al. Use of dry-processed carrots to improve the sensory quality and drying characteristic of composite pork jerky [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 125-133

收稿日期: 2020-02-12

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2019B020212002)

作者简介: 阮征 (1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与保藏

通讯作者: 李泮生 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏

carrots could reduce 10.27%~30.47% of the total energy consumed during the drying of composite jerky, and the total energy consumption decreased with an increase in the degree of pre-drying of diced carrots, with the difference in total energy consumption between D10 and D30 being insignificant.

**Key words:** diced carrot; pre-drying; composite jerky; sensory quality; drying characteristics

肉脯是我国传统的肉类调味干制品,相较于其他肉制品,具有高蛋白、低脂肪、食用和携带方便等优点,并且滋味咸中微甜,带有焙烤的焦香和天然香辛料的风味,是一种备受广大消费者喜爱的休闲零食<sup>[1]</sup>。当下随着人们对于健康饮食关注度的不断提高,果蔬元素被广泛应用于动物性食品中,增加其营养价值,同时改善口感和风味<sup>[2,3]</sup>。胡萝卜是人们经常食用的植物性食物,除含有多酚、维生素、膳食纤维等果蔬中常见的生理活性物质外,其可食部分中富含胡萝卜素(2.1~4.2 mg/100 g),胡萝卜素又被称为维生素 A 原,是人体内 V<sub>A</sub> 的重要来源,其中又以  $\beta$ -胡萝卜素的 V<sub>A</sub> 转化效价最高。此外,  $\beta$ -胡萝卜素还具有抗氧化、增强免疫力、肿瘤的预防和治疗等功效<sup>[4]</sup>。

近年来国内外报导了大量关于胡萝卜复合肉制品的研究,主要基于复合香肠、复合肉丸和肉糜脯三种产品形式,肉糜脯作为半干肉制品,加工过程中除了关注肉糜的加工特性还需要进行干燥处理。Sanjay 等将干制的胡萝卜渣和麦麸加水打浆,过滤去除液体后于 58 °C±2 °C 下干制成渣,再与鸡肉糜混合灌肠,于沸水中煮制 30 min 制成胡萝卜渣鸡肉肠<sup>[5]</sup>;莫开菊等将新鲜胡萝卜直接打浆与猪肉糜混合制成复合肉糜脯,通过微波烘烤工艺节约干燥时间和能耗<sup>[6]</sup>;詹飞丽等将新鲜胡萝卜和菠菜榨汁与鸡肉糜混合,于 50 °C 和 65 °C 分段干燥成半成品,再经烤制熟化制成双色鸡肉糜脯<sup>[7]</sup>。现有的研究主要关注原料的种类和添加量、复合方式、干燥工艺等方面对复合肉脯品质的影响,主要复合方式是将胡萝卜以汁、浆、泥、渣等形式添加入肉脯中。然而,形成的复合肉脯胡萝卜风味和口感不突出,无法在外观上体现胡萝卜原本的状态。部分研究以颗粒状胡萝卜进行添加,却忽视了干燥过程中胡萝卜和肉糜的物料特性存在差异,干燥速率不同从而导致复合肉脯出现裂纹、水分分布不均等问题。因此市售的胡萝卜肉脯大多为胡萝卜味、胡萝卜汁肉脯,缺乏胡萝卜颗粒形态完整的产品。

本研究关注复合肉脯中胡萝卜和肉糜干燥特性的差异,将预处理至不同水分含量的胡萝卜丁与肉糜混合制备复合肉脯,评价胡萝卜丁预干燥处理对复合肉脯感官品质的影响,研究干燥过程中水分的迁移和变化,为胡萝卜丁复合肉脯的开发和工艺改良提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

市售新鲜猪后腿肉(肥瘦比为 1:5,湿基含水量 74.30%±0.34%)、新鲜胡萝卜(湿基含水量为 91.75%±0.50%)、白砂糖、食盐。

### 1.2 仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9070A),上海申贤恒温设备厂;小型家用绞肉机(S18-A928),九阳股份有限公司;家用小型全自动搅拌机(CM-1200),中山卡士电器有限公司;单反相机(EOS 800D),佳能(中国)有限公司;便携式色差仪(CR-400),日本 Konica Minolta 公司;物性测定仪(TA.XT.Plus),英国 Stable Micro System 公司;水分活度仪(Series 3TE),美国 Aquilab 公司;低场核磁共振仪(Micro MR),上海纽迈电子科技有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 胡萝卜丁预处理

新鲜胡萝卜洗净去皮,切分为 6 mm 的立方体丁状,于 100 °C 沸水中烫漂 2 min,料液比为 1:10。沥干冷却后在 0.3 g/mL 的蔗糖溶液中腌渍 12 min(渗糖含量为 450 mg/g 干重),沥干腌渍液,此时胡萝卜丁的水分含量为 83.6%±0.2%。再于 65 °C 恒温干燥箱中干燥至水分含量为 70%、50%、30% 和 10%(单次装载量为干重 0.061 kg)。密封后保藏于 4 °C 下备用。干燥过程中每隔 30 min 取样,测定胡萝卜丁的水分含量,绘制干燥曲线并进行方程拟合。

#### 1.3.2 肉糜制备方法

新鲜猪肉切除脂肪、猪皮、结缔组织,顺着猪肉纹理纵切成小块,绞肉机搅碎(高速模式搅打 10 s),拌入蔗糖和食盐混合均匀(蔗糖、食盐质量占比分别为 20%,2%),密封静置 2 h。该方法制备的猪肉糜水分含量为 56.0%±0.5%。

#### 1.3.3 复合肉脯制备工艺

将 1.3.1 方法得到的不同水分含量的胡萝卜丁按照干重占比为 20% 添加入 1.3.2 方法所得的肉糜中,采用搅拌机的中式面团模式搅拌 8 min,使肉糜与胡

萝卜丁混合均匀,按照 8 g 肉糜当量精准称量(每片肉脯实际含肉糜 2.82 g DW,胡萝卜丁 0.70 g DW)制作复合肉脯(模具直径为 40 mm,厚度 5 mm)。脱模后于 65 °C 恒温干燥至水分活度降至 0.7 以下(单次装载量为干重 0.053 kg),再置于 180 °C 下烘烤 3 min 进行熟化。本方法制备的复合肉脯水分活度降至 0.7 以下,可以有效抑制绝大多数微生物的生长,延长复合肉脯样品的保藏时间。

### 1.3.4 外观和色差值的测定

取干燥终点(水分活度达 0.7)的复合肉脯样品,采用单反相机拍摄外观,CR-400 全自动色差仪的

CIE-LAB 模式测定肉脯表面的色差值,每个样品平行测定 6 次。

### 1.3.5 剪切力的测定

取干燥终点的样品,参考 Ji-Hun Choi 等的方法<sup>[8]</sup>进行测定,将复合肉脯沿圆面中轴位置修剪成长 30 mm、宽 10 mm 的条状,选用 Warner-Bratzler 剪切刀片组件,样品垂直平放在刀片下方,沿刀片垂直方向调整位置,保证每次恰好切中 1 粒胡萝卜丁,参数设定如下:测中速度 2 mm/s,测后速度 10 mm/s,距离 80 mm。每个样品平行测定 6 次。

### 1.3.6 感官评定

表 1 复合肉脯的感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of composite jerky with diced carrot

项目	总分值	标准	分值
色泽	25	颜色发白或发暗,不均匀,无光泽	0~8
		颜色均匀,光泽一般	9~16
		颜色均匀,有光泽,胡萝卜丁色泽鲜艳	17~25
香气	20	香气淡,有异味,胡萝卜丁与肉糜香气不协调	0~7
		香气一般,无明显异味,胡萝卜丁与肉糜香气相适宜	8~13
		胡萝卜丁与肉糜香气突出且相适宜,无异味	14~20
质地	20	整体质地硬,胡萝卜丁硬度与肉糜不相适宜	0~7
		整体质地一般,胡萝卜丁硬度与肉糜相适宜但难以区分	8~13
		整体质地柔润,胡萝卜丁硬度与肉糜相适宜且有区分度	14~20
口感	20	肉质粗糙难嚼,回味少;胡萝卜丁干硬,有渣滓感	0~7
		肉质一般,略有回味;胡萝卜丁较柔韧,有渣滓感	8~13
		肉质细腻耐嚼,有回味;胡萝卜丁柔韧无渣滓感	14~20
组织状态	15	片形不规则,厚薄不均匀,有裂纹	0~5
		片形基本完整、均匀,无明显裂纹	6~10
		片形完整,厚薄均匀,无裂纹	11~15

感官评定小组由 10 位受过专业培训的评定员组成,参考李玉邯和刘欣等的方法<sup>[9,10]</sup>进行双盲实验。

取干燥终点的样品,按照表 1 进行感官评定。

### 1.3.7 水分指标测定

分别测定干燥过程中的复合肉脯、分离的肉糜和胡萝卜丁的水分含量和水分活度。水分含量的测定参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》中的直接干燥法。水分活度的测定参考 GB 5009.238-2016《食品水分活度的测定》中水活仪扩散法。

### 1.3.8 水分迁移特性

复合肉脯样品于干燥前、样品整体水分活度达 0.7 以及内部胡萝卜丁水分活度达 0.7 时,分别进行低场核磁共振(LF-NMR)和核磁共振成像(MRI)检测。

LF-NMR 检测<sup>[11,12]</sup>:采用低场核磁共振检测复合肉脯干燥过程中水分移动性和分布状态的变化,利用 CPMG 脉冲序列测定横向弛豫时间( $T_2$ )。设备温度

稳定在  $32\pm 0.05$  °C,质子共振频率 SF=20 MHz,采样频率 SW=200 kHz,模拟增益 RG1=5 db,采样点 TD=230,前置放大倍数 PRG=1,采样等待时间 TW=3500 ms,累加次数 NS=8。

MRI 检测<sup>[12]</sup>:采用核磁共振成像检测复合肉脯干燥过程中水分的动态分布,利用自旋回波(SE)序列测定质子密度加权图像。设备温度稳定在  $32\pm 0.05$  °C,FOVRead=100 mm,FOVPhase=100 mm,RFA90=2.8%,RFA180=5.2%,K 空间分辨率=156×192,重复时间 TR=500 ms,回波时间 TE=5.9 ms,激励次数 Averages=4。

### 1.3.9 耗能计算

单位耗能是评价干燥工艺的重要指标,表示从物料中蒸发出一定质量的水分所消耗的能量。参考方申柱的方法<sup>[13]</sup>,分段计算单位质量(kg,干重)胡萝卜丁预干燥和复合肉脯干燥过程的能耗,根据干重占比

换算得到干燥过程的总耗能。单位耗能 (unit energy consumption, UEC, 单位: kW·h/kg) 计算公式如下:

$$UEC = \frac{t \times P \times (1 - M_0)}{m_0 \times (M_0 - M_t)}$$

式中:  $t$  为干燥时间 (h);  $P$  为恒温干燥箱功率 (W);  $M_0$  为初始含水率 (%);  $m_0$  为初始重量 (kg);  $M_t$  为  $t$  时刻的含水率 (%)。

### 1.3.10 数据处理与分析

实验数据用 Origin 9.1 和 SPSS 22.0 处理, 其中采用皮尔逊 Pearson 法进行相关性分析,  $p < 0.05$  为显著相关,  $p < 0.01$  为极显著相关; 采用 Duncan's 新复极差分析法进行显著性分析, 置信区间取 95%。

## 2 结果与分析

### 2.1 胡萝卜干燥曲线及拟合方程

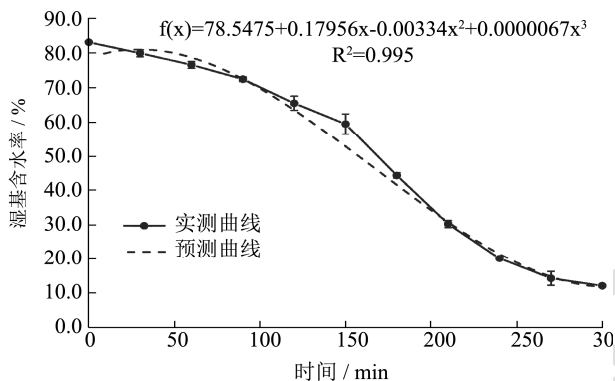


图1 胡萝卜的干燥曲线及拟合曲线

Fig.1 Drying and prediction fitting curve of diced carrot

图1 为干燥过程中胡萝卜的干燥曲线及拟合形成的预测曲线, 胡萝卜的湿基含水率随干燥时间递

减, 干燥速率先增大后减小。预测曲线  $f(x) = 78.5475 + 0.17956x - 0.00334x^2 + 0.0000067x^3$ ,  $R^2 = 0.995$ , 与实测曲线重合程度较高, 说明在 1.3.1 所述实验条件下该拟合方程可通过干燥时间有效预测胡萝卜丁水分含量。

### 2.2 复合肉脯外观和色差值

外观是食品最直观的感官品质, 直接影响消费者的可接受程度。文中分别以 D70、D50、D30、D10 代表添加了预干燥至水分含量为 70%、50%、30%、10% 的胡萝卜丁的复合肉脯样品, ND 代表添加了未经干燥的胡萝卜丁的复合肉脯样品。

由图 2 可以看出, ND 组样品表面不平整, 肉糜和胡萝卜丁之间出现孔隙和裂纹, 而经过预干燥的 D70、D50、D30 和 D10 组形态得到明显的改善, 表面光滑, 无肉眼可见的孔隙和裂纹。出现这一现象的原因是不同物料之间由于物质组成、结构差异而导致干燥特性存在差异, 干燥过程中新鲜的胡萝卜丁和肉糜随水分的蒸发物料体积收缩, 从而分离形成孔隙和裂纹, 而经过预干燥处理的胡萝卜丁体积收缩, 与肉糜混合后适度复水膨胀, 一方面使得两者之间的结合更紧密, 另一方面促进两者之间的物质尤其是水分的交换。

由表 2 可知, 添加预干燥胡萝卜丁的复合肉脯的亮度值  $L^*$  显著大于 ND, 红度值  $a^*$  和黄度值  $b^*$  显著小于 ND, 与图 2 显示的外观观察结果一致。造成这一结果的原因可能是胡萝卜丁经过预干燥的复合肉脯样品形态较完整, 表面平整光泽度高, 有较大的  $L^*$  值; 同时相较于 ND, 胡萝卜丁暴露在肉脯表面的面积小, 表现出较小的  $a^*$  值和  $b^*$  值。

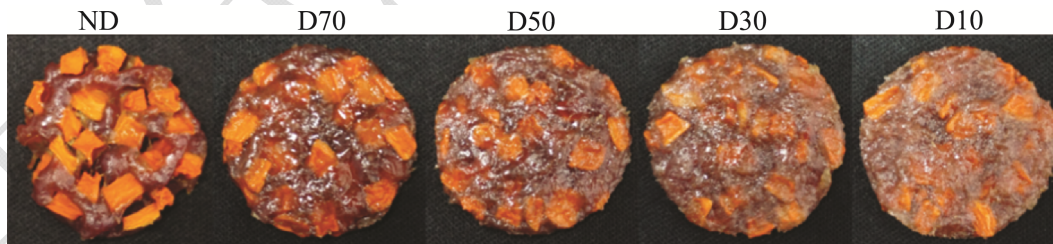


图2 复合肉脯的外观

Fig.2 The appearances of composite jerky

表2 复合肉脯的色差值

Table 2 Color values of composite jerky

样品编号	ND	D70	D50	D30	D10
$L^*$	53.34±0.89 <sup>b</sup>	55.24±0.71 <sup>a</sup>	56.03±1.54 <sup>a</sup>	55.12±1.21 <sup>a</sup>	56.04±0.81 <sup>a</sup>
色差值	$a^*$	20.44±1.70 <sup>a</sup>	15.52±1.19 <sup>b</sup>	13.17±1.57 <sup>c</sup>	14.64±1.11 <sup>bc</sup>
	$b^*$	25.29±0.55 <sup>a</sup>	22.38±0.72 <sup>b</sup>	20.66±0.86 <sup>c</sup>	19.78±0.74 <sup>cd</sup>

注: 同行小写字母不同者差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表3 复合肉脯的剪切力

Table 3 The shearforce of composite jerky

样品编号	ND	D70	D50	D30	D10
剪切力/(kg·sec)	24.34±0.73 <sup>a</sup>	19.36±0.38 <sup>a</sup>	21.22±0.60 <sup>a</sup>	21.98±1.28 <sup>a</sup>	22.51±0.63 <sup>a</sup>

注：同行小写字母不同者差异显著 ( $p < 0.05$ )。

表4 胡萝卜丁水分含量与干燥时间及复合肉脯感官指标的相关性分析

Table 4 Correlation between moisture content of diced carrot and drying time, sensory indicators of composite jerky

指标	L*	a*	b*	剪切力/kg·sec	色泽/分	香气/分	质地/分	口感/分	组织状态/分	干燥时间/h	肉脯干燥时间/h
R <sup>2</sup>	-0.758	0.812	0.950*	0.090	0.097**	-0.886	0.645	0.028	-0.681	-0.991**	0.943*

注：上标“\*”表示显著相关， $p < 0.05$ ；“\*\*”表示极显著相关， $p < 0.01$ 。

### 2.3 复合肉脯剪切力

剪切力可用于衡量肉脯的硬度，是评价肉脯品质优劣的重要指标<sup>[14]</sup>。由表3可知，添加不同水分含量胡萝卜丁的复合肉脯剪切力范围为19.36~24.34 kg·sec，按递减排序为：ND>D10>D30>D50>D70，但是添加不同水分含量胡萝卜丁对复合肉脯的剪切力影响不明显 ( $p > 0.05$ )，表明添加的胡萝卜丁的干燥程度对最终复合肉脯的硬度影响不大。研究发现猪肉脯剪切力受其整体水分含量的影响，在烘烤过程中随水分含量降低剪切力显著增加，复合肉脯干燥后水分含量在10%~40%之间，剪切力为3.5~5.0 kg·sec<sup>[15]</sup>，本研究中测定的复合肉脯干燥终点控制在相同水分条件下，因此硬度相当。

### 2.4 感官分析

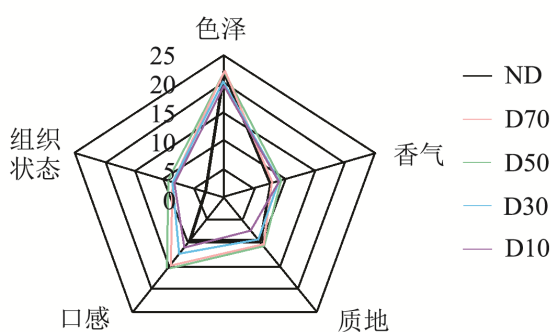


图3 复合肉脯的感官评定分值

Fig.3 Sensory evaluation scores of composite jerky

由图3可知，与ND相比，D70、D50、D30和D10的口感和组织状态得到了明显的改善；D70、D50和D30的质地优于ND，但干燥程度较高的D10质地得分比ND低，说明胡萝卜丁水分含量过低也会对复合肉脯的质地产生不利影响；除D70外，其余干燥处理组的香气得分均高于ND；除D70外，其余干燥处理组的色泽得分均低于ND，这一结果与图2反映的

观察结果相一致。研究发现添加4%~8%的洋葱粉可以改善复合肉脯的感官评价，并降低复合肉脯的POV值<sup>[9]</sup>，添加40%以下含量的2~3 mm质构化小麦蛋白可以改善复合肉脯的感官品质<sup>[9,10]</sup>，本研究发现添加不同干燥程度的胡萝卜丁也会影响复合肉脯各项感官得分，胡萝卜丁预处理至水分含量为30%~70%时，可以显著增加复合肉脯的感官总分值。

### 2.5 相关性分析

复合肉脯所体现的感官品质是各项感官指标综合作用的结果，表4显示了复合肉脯各项感官指标和预干燥胡萝卜丁的水分含量之间的相关性。可以看出，复合肉脯的b\*值、色泽与胡萝卜丁水分含量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )，与表2和图3的结果相一致。胡萝卜丁预干燥水分含量与其干燥时间呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ )，相关系数 $r_1 = -0.991$ ，与复合肉脯的干燥时间呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )， $r_2 = 0.943$ ，说明胡萝卜丁的预干燥程度显著影响胡萝卜丁预干燥和复合肉脯的干燥速率，因此探究添加前胡萝卜丁的预干燥程度对优化复合肉脯干燥工艺具有重要意义。

### 2.6 胡萝卜丁复合肉脯的干燥特性

图4a为复合肉脯干燥过程中湿基含水量的变化，变化分为两个阶段，干燥初期水分含量下降较快，后期下降速度放缓，曹叶萍等研究温度对猪肉脯干燥曲线的影响也得到类似的结论<sup>[15]</sup>。原因是因为干燥初期样品整体水分含量高，与环境水分分压差大，有利于样品中的水分向环境中扩散，同时样品潮湿表面先受热水分快速蒸发，内部升温慢，水分蒸发也相对较慢，与样品表面形成水分梯度，推动水分由样品内部向表面扩散，故干燥速率相对较大；后期样品内外水分分压差减小，且随着干燥时间的延长复合肉脯表面干结阻碍水分向外迁移，最终导致干燥速率减小。

图4b中复合肉脯吸湿等温线揭示了干燥过程中

水分活度随水分含量变化的规律, 由图可以看出, 干燥前, 添加不同水分含量胡萝卜丁的复合肉脯的水分活度存在明显差异,  $ND > D70 > D50 > D30 > D10$ , 但是干燥过程中在同一水分含量条件下, 不同处理组之间的水分活度无明显差别, 吸附等温线变化趋势趋于一致。

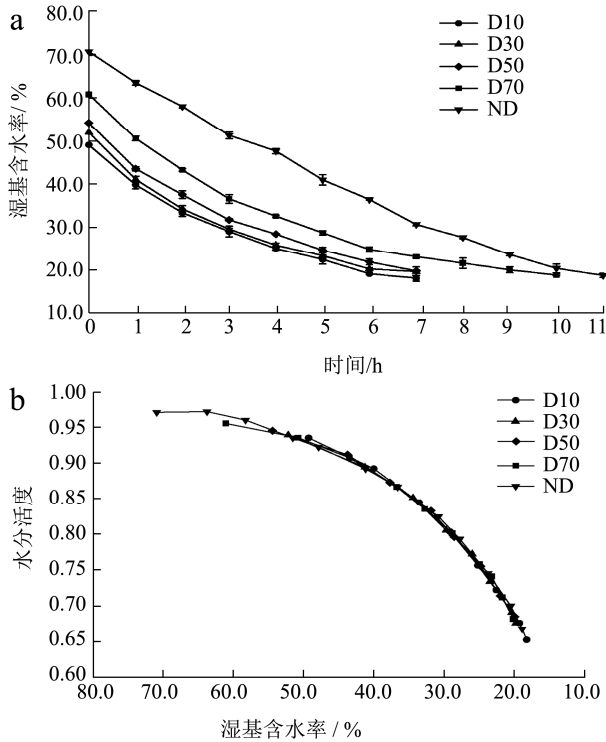


图4 复合肉脯的干燥曲线 (a) 和吸湿等温线 (b)

Fig.4 Drying curves and moisture sorption isotherms of composite jerky

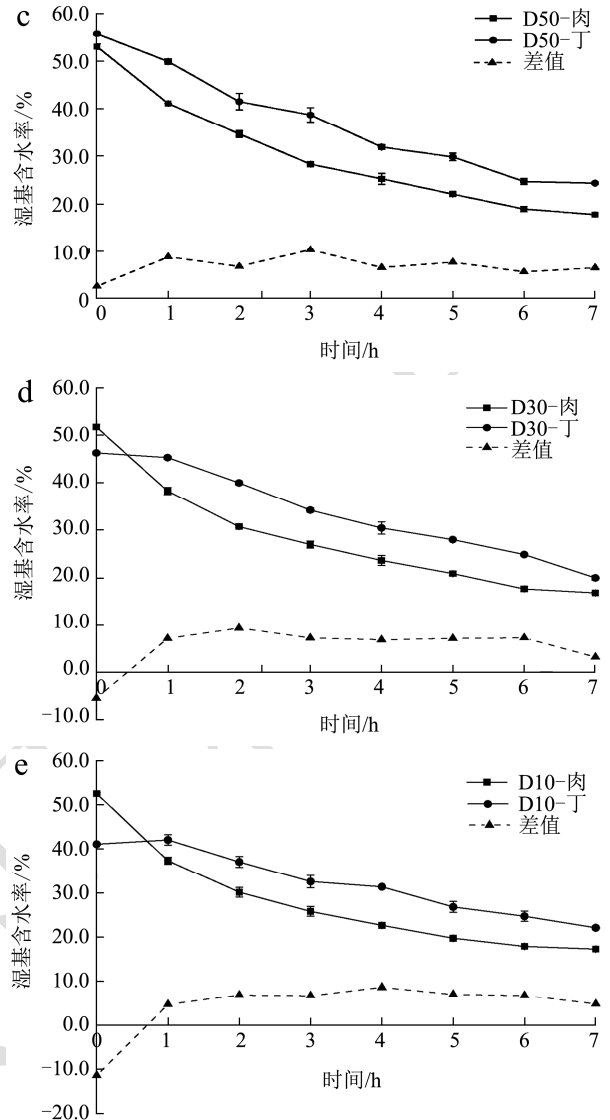
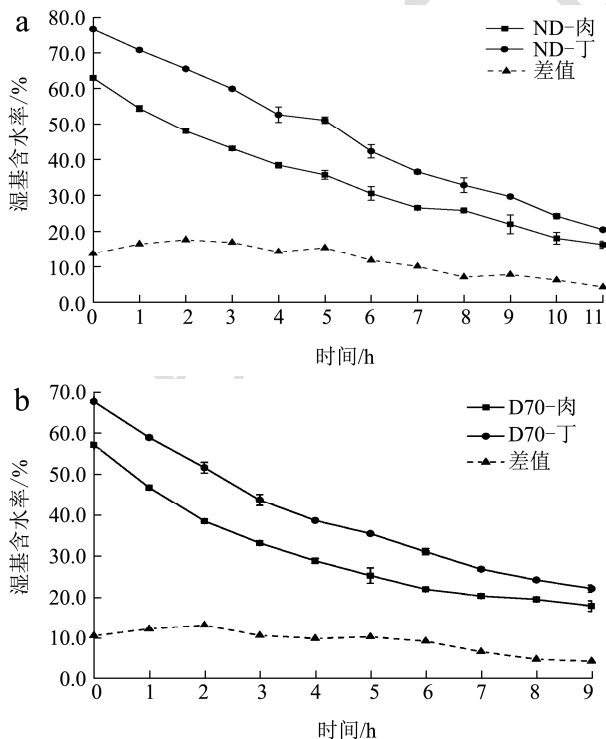


图5 复合肉脯干燥过程肉糜和胡萝卜丁水分含量的变化

Fig.5 Drying curves of separated meat paste and diced carrot in composite jerky

注: a: 胡萝卜丁未经干燥; b: 胡萝卜丁预干燥水分含量为 70%; c: 胡萝卜丁预干燥水分含量为 50%; d: 胡萝卜丁预干燥水分含量为 30%; e: 胡萝卜丁预干燥水分含量为 10%; 差值为丁与肉糜的湿基含水率之差。

干燥过程中复合肉脯作为一个整体与环境进行水分交换, 其中肉糜和胡萝卜丁之间也进行水分的动态迁移, 干燥处理会加速这一系列迁移过程。图 5 进一步揭示干燥过程中水分在肉糜和胡萝卜丁之间的迁移规律, ND、D70 和 D50 中胡萝卜丁的水分含量始终高于肉糜, 两者均符合干燥速率先快后慢的变化规律, 但两者水分含量差值先变大再变小, 说明干燥初期肉糜中的水分蒸发速率高于胡萝卜丁; D30 和 D10 中两者的干燥曲线在干燥初期有交叉, 干燥前胡萝卜丁水分含量低于肉糜, 干燥初期水分迅速向胡萝卜丁中迁移, 使得 1 h 时胡萝卜丁水分含量反而高于肉糜, 1 h

后的变化规律与ND、D70、D50类似。干燥开始1 h内完成水分交换后，肉糜和胡萝卜丁之间始终存在水分含量差，胡萝卜丁干燥脱水较肉糜呈现滞后现象。胡萝卜丁和肉糜之间进行水分的相互交换，同时也会引起水溶性蛋白质、水溶性维生素、氨基酸等的相互渗透，物质的迁移渗透使得胡萝卜丁和肉糜结合更加紧密，风味更加和谐。

### 2.7 复合肉脯水分状态的变化

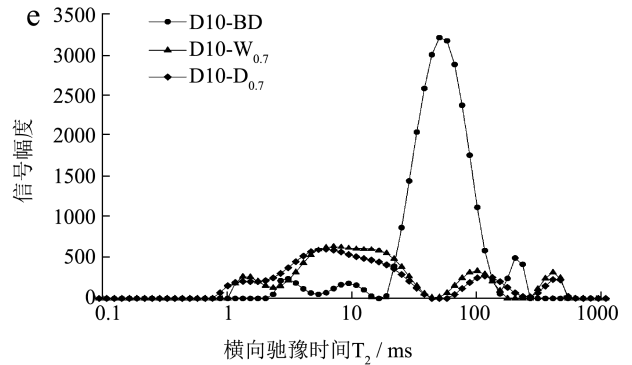
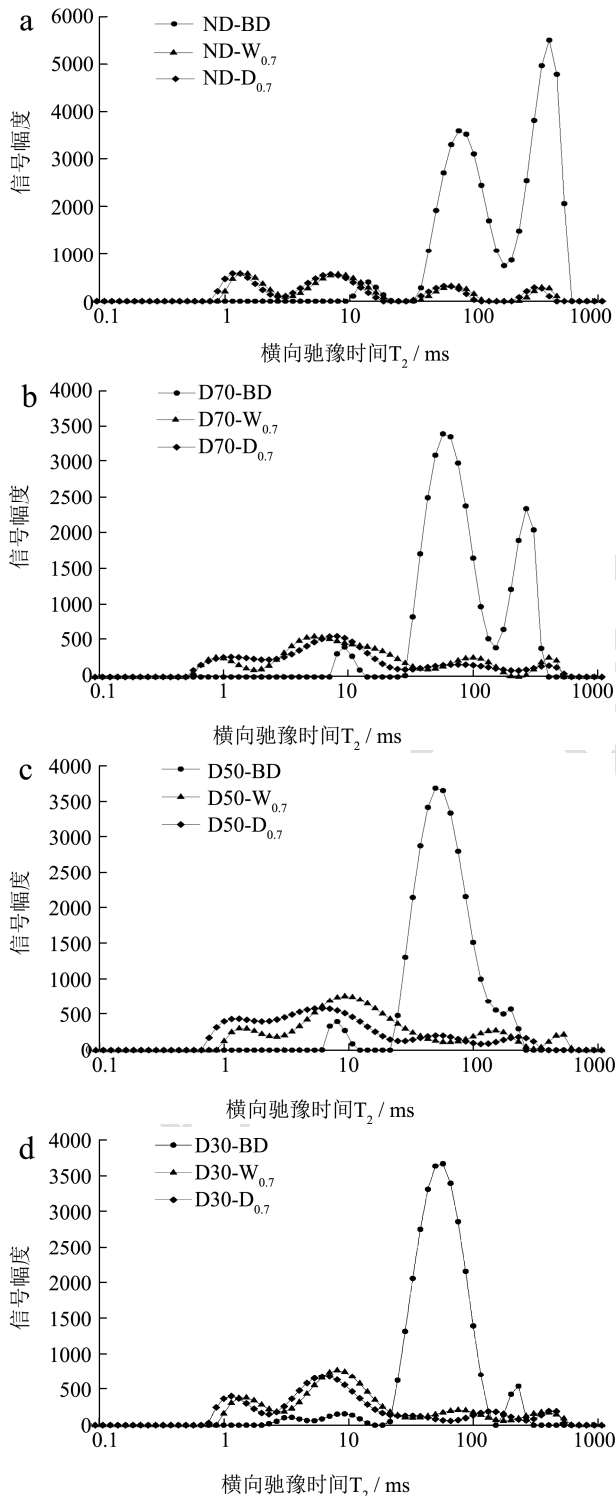


图6 不同水分含量的胡萝卜丁对复合肉脯干燥前后  $T_2$  弛豫时间的影响

Fig.6 Influences of diced carrot moisture content on  $T_2$  relaxation times of composite jerky

注：a: 胡萝卜丁未经干燥；b: 胡萝卜丁预干燥水分含量为70%；c: 胡萝卜丁预干燥水分含量为50%；d: 胡萝卜丁预干燥水分含量为30%；e: 胡萝卜丁预干燥水分含量为10%。BD: 干燥前； $W_{0.7}$ : 复合肉脯整体水分活度达0.7； $D_{0.7}$ : 胡萝卜丁水分活度达0.7。

低场核磁共振技术可以对样品进行实时的无损检测，分析样品中水分的状态和空间分布信息。水分是新鲜肌肉组织中含量最高的化学组分，根据其不同存在状态，可将肉与肉制品中的水分分为结合水、不易流动水和自由水，分别为与肉中大分子相互作用结合紧密的水、肌原纤维和网状组织中的水以及细胞外间隙中的水，对应的  $T_2$  值范围依次为  $T_{21}$  (1~10 ms)、 $T_{22}$  (10~100 ms)、 $T_{23}$  (100~1000 ms)，其对应的曲线下面积  $A_{21}$ 、 $A_{22}$  和  $A_{23}$  表示各状态水分的相对含量<sup>[11,15,16]</sup>。由图6可以看出，干燥前复合肉脯  $T_2$  主要集中在10~1000 ms 之间，水分的自由度相对较高，且添加的胡萝卜丁水分含量越高，复合肉脯在100~1000 ms 内的自由水相对含量越高；干燥后  $T_2$  值均减小，此时自由水相对含量大幅降低，结合水和不易流动水相对含量增加，成为复合肉脯中水分的主要存在状态。由于物料性质存在差异，干燥过程中被肉糜包裹的胡萝卜丁水分比肉糜更难脱除，因此在复合肉脯整体水分活度达到0.7之后，需要进一步干燥处理，使  $T_2$  值继续减小，才能确保胡萝卜丁的水分活度降至0.7。

在 Zhang 等关于猪肉肠低温发酵的研究中，发现随发酵时间延长猪肉肠的  $T_2$  值减小，自由水和不易流动水的相对含量不断下降，并且猪肉肠中脂肪含量越低，发酵后样品中水分的自由度越低，林婉瑜等关于鱼糜的研究发现热处理会使鱼糜的  $T_2$  值减小，降低样品中水分的自由度，同时食盐的添加量对自由水含量有显著影响，因此适当的前处理和添加物可以有效改善肉制品的持水性<sup>[17,18]</sup>。

表 5 复合肉脯干燥过程总耗能

Table 5 Energy consumption during drying process of composite jerky

样品编号	胡萝卜丁干燥耗能			混合肉糜干燥耗能			总耗能/(kW·h/kg)	相对耗能/%
	装载量/kg	干燥时间/h	单位耗能/(kW·h/kg)	装载量/kg	干燥时间/h	单位耗能/(kW·h/kg)		
ND	0.061	0	0	0.053	10.08±0.10	200.42±1.03	200.42±1.82 <sup>a</sup>	100.00
D70	0.061	1.69±0.04	29.31±0.19	0.053	8.75±0.06	173.98±0.71	179.84±0.91 <sup>b</sup>	89.73
D50	0.061	2.81±0.15	48.74±0.07	0.053	7.10±0.12	141.17±1.62	150.92±1.09 <sup>c</sup>	75.30
D30	0.061	3.50±0.03	60.66±2.00	0.053	6.45±0.05	128.25±0.93	140.38±0.75 <sup>d</sup>	70.04
D10	0.061	5.21±0.12	90.33±0.17	0.053	6.10±0.17	121.29±1.27	139.35±1.02 <sup>d</sup>	69.53

注：装载量以干重计；相对耗能=总耗能/未将干燥的胡萝卜丁复合肉脯的总耗能；同行小写字母不同者差异显著 ( $p<0.05$ )。

### 2.8 复合肉脯水分分布的变化

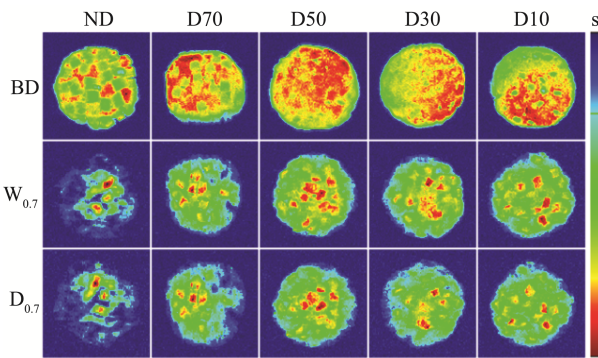


图 7 复合肉脯的质子密度加权图

Fig.7 The proton density weighted images of composite jerky

注：S：为色彩标尺，颜色越接近红色端代表质子密度越大；BD：干燥前；W<sub>0.7</sub>：复合肉脯整体水分活度达 0.7；D<sub>0.7</sub>：胡萝卜丁水分活度达 0.7。

图 7 为复合肉脯添加 JET 伪彩的质子密度加权图像，可以直观地反映样品中氢质子的分布状态<sup>[12]</sup>。在复合肉脯体系中，除了水分之外，氢质子信号还可由蛋白质、糖类、脂肪等含有氢质子的成分产生<sup>[16]</sup>，图 7 中同一列图像为同一样品干燥过程中测得，因此其氢质子变化主要由水分变化引起，可以看作是水分变化。由图 7 可知，复合肉脯干燥前水分较为均匀地分散其中，干燥后水分含量明显降低，且主要以斑块状分布在样品中心部位，结合图 5 的结果可知此时水分含量高的斑块区域为胡萝卜丁，说明靠近中心部位的胡萝卜丁水分较肉糜和边缘部位的胡萝卜丁更难脱除。对比添加不同水分含量胡萝卜丁的复合肉脯，干燥前 ND 和 D10 由于肉糜和胡萝卜丁水分含量差大，故在图像中形成清晰界限，易于区分，而 D70、D50 和 D30 分散较为均匀；干燥后 D70、D50、D30 和 D10 除水分较为集中的斑块区域，其余部位分布均匀，而 ND 水分主要集中在中心部位，边缘部位水分含量极低，几乎与环境一致，水分分布差异使得 ND 的口感

和组织状态劣于干燥处理组（图 3）。这与王召君等关于南酸枣糕烘干过程中水分变化的研究结果相似，干燥过程中样品水分并非均匀一致向外迁移，内部迁移速率低于表层，导致干燥后 NMR 图像中氢质子主要集中在样品内部<sup>[19]</sup>。这说明凝胶类样品干燥过程中仅关注整体水分含量和水分活度是远远不够的，还需要关注水分迁移和变化的规律，核磁共振成像可以有效监测干燥过程中样品整体和局部水分的分布。

### 2.9 复合肉脯干燥耗能

由表 5 可知，随添加的胡萝卜丁水分含量的减小，复合肉脯干燥总耗能（包括胡萝卜丁预处理耗能）依次递减。相对于 ND 组，胡萝卜丁预干燥至水分含量为 10%~70% 可以使复合肉脯的干燥总耗能降低至 69.53%~89.73%，说明胡萝卜丁预干燥处理可以有效节约整个干燥过程的能耗。另外，D30 和 D10 之间的相对耗能无显著差异 ( $p>0.05$ )，说明胡萝卜丁干燥至一定程度后再降低水分对减少总耗能贡献不大，同时过度干燥还会降低复合肉脯的色泽和质地得分（图 3），对感官品质造成不利影响。胡萝卜丁单独干燥的速率远高于其在混合肉糜中的干燥速率，胡萝卜丁预干燥以脱除部分水分，可以有效减少复合肉脯干燥所需脱除的水分，同时复合肉脯干燥前期水分在肉糜和胡萝卜丁之间的迁移可以加速水分的平衡。本研究通过控制工艺条件来改变复合肉脯的干燥能耗，有研究显示通过控制样品尺寸、改变环境中温湿条件以及冷冻、真空等辅助干燥方法也可以有效缩短干腌肉制品的干燥时间，提高生产效率<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

添加新鲜胡萝卜丁的复合肉脯干燥过程中会因为物料性质差异而造成干裂、水分分布不均等品质劣化问题。研究发现，胡萝卜丁的预干燥处理可以显著改善复合肉脯的外观形态、口感和组织状态，提高复合



肉脯的光泽度和持水性,且不影响复合肉脯的硬度,但预干燥的水分含量低于30%会降低色泽和质地评分。添加预干燥的胡萝卜丁可使复合肉脯整个干燥过程中的能耗降低至对照组的69.53%~89.73%,随添加的胡萝卜丁水分含量的减小,复合肉脯干燥总耗能依次递减,但D10组的干燥总耗能相较于D30变化不显著。复合肉脯的感官品质是各项感官指标的综合体现,胡萝卜丁过度预干燥不仅会对复合肉脯的感官产生不良影响,降低符合肉脯的持水性,还会降低干燥效率,造成能源的浪费。本研究发现,当胡萝卜丁的预干燥水分含量为30%时,制得的复合肉脯感官较优,且可以最大程度地节省约30%的能耗。实际加工过程中,如果需要综合考虑复合肉脯的各项品质特性和干燥能耗,则可通过预干燥处理将胡萝卜丁的水分含量控制在30%左右。

### 参考文献

- [1] Yang H, Hwang Y, Joo S, et al. The physicochemical and microbiological characteristics of pork jerky in comparison to beef jerky [J]. *Meat Science*, 2009, 82(3): 289-294
- [2] Savadkoobi S, Hoogenkamp H, Shamsi K, et al. Color, sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace [J]. *Meat Science*, 2014, 97(4): 410-418
- [3] El-Nashi H B, Pathera A K, Islam R UI, et al. Quality characteristics of beef sausage containing pomegranate peels during refrigerated storage [J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2015, 60(2): 403-412
- [4] 朱秀灵,车振明,徐伟,等. $\beta$ -胡萝卜素的生理功能及其提取技术的研究进展[J].*广州食品工业科技*,2004,20(2):158-162  
ZHU Xiu-ling, CHE Zhen-ming, XU Wei, et al. Science and Technology of Guangzhou Food Industry [J]. 2004, 20(2): 158-162
- [5] Yadav S, Pathera A K, Islam R U, et al. Effect of wheat bran and dried carrot pomace addition on quality characteristics of chicken sausage [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2017, 31(5): 729-737
- [6] 莫开菊,秦恩华,程丹.微波法生产胡萝卜猪肉脯的工艺研究[J].*食品工业科技*,2005,26(11):133-135  
MO Kai-ju, QIN En-hua, CHENG Dan. Study on microwave processing on pork jerky with carrots [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2005, 26(11): 133-135
- [7] 詹飞丽,王亚萍,邵建峰,等.双色蔬菜鸡肉糜脯加工工艺研究[J].*肉类工业*,2019,461:1-4  
ZHAN Fei-li, WANG Ya-ping, SHAO Jian-feng, et al. Study on the processing of double-colored composite chicken jerky [J]. *Meat Industry*, 2019, 461: 1-4
- [8] Choi J H, Jeong J Y, Han D J, et al. Effects of pork/beef levels and various casings on quality properties of semi-dried jerky [J]. *Meat Science*, 2008, 80(2): 278-286
- [9] 李玉邯,陈宇飞,杨柳,等.洋葱粉对猪肉脯品质及抗氧化性能的影响[J].*中国调味品*,2015,40(10):36-38  
LI Yu-han, CHEN Yu-fei, YANG Liu, et al. Effect of onion powder on the antioxidant characteristics of pork jerky [J]. *China Condiment*, 2015, 40(10): 36-38
- [10] 刘欣,李汴生,阮征,等.添加质构化小麦蛋白的复合鸡肉糜脯质地和口感的研究[J].*食品与发酵工业*,2010,36(8):162-166  
LIU Xin, LI Bian-sheng, RUAN Zheng, et al. Study on texture and mouth feel of composite chicken jerky by adding textured wheat protein [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(8): 162-166
- [11] Ojha K S, Kerry J P, Tiwari B K. Investigating the influence of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and moisture migration measurement in *Lactobacillus sakei* cultured and uncultured beef jerky [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 81: 42-49
- [12] Kamal T, Zhang T, Song Y, et al. Water dynamics and physicochemical analysis of two different varieties of apple jam (Fuji) and (Yinduqing) by LF-NMR and MRI [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2018: 20170225
- [13] 方申柱,韩久春,王文江,等.疏浚底泥微波干燥特性及耗能分析[J].*南水北调与水利科技*,2015,13(6):108-112  
FANG Shen-zhu, HAN Jiu-chun, WANG Wen-jiang, et al. Drying characteristics and energy consumption of microwave-dried dredged sediment [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 108-112
- [14] 李培红,王怀欣,郇延军.复合磷酸盐和木瓜蛋白酶对猪肉脯嫩化效果对比研究[J].*肉类工业*,2011,358:34-42  
LI Pei-hong, WANG Huai-xin, XUN Yan-jun. Comparative study of tenderizing processing on pork jerky by composite phosphate and papain [J]. *Meat Industry*, 2011, 358: 34-42
- [15] 曹叶萍,郇延军,高静.烘烤过程中水分分布和蛋白变性对猪肉脯质构的影响[J].*食品与机械*,2019,35(1):31-37  
CAO Ye-ping, XUN Yan-jun, GAO Jing. Effects of moisture distribution and protein denaturation on texture of pork jerky during drying and baking processing [J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(1): 31-37