

# 花椰菜超声波预处理工艺优化及干燥过程中水分状态分析

杨慧珍<sup>1,2</sup>, 肖亚冬<sup>1,2\*</sup>, 王娟<sup>1</sup>, 杨亦雯<sup>1,3</sup>, 聂梅梅<sup>1</sup>, 宋江峰<sup>1</sup>, 刘春泉<sup>1</sup>, 李大婧<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)(2. 南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095)  
(3. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 该研究对干燥前的花椰菜进行超声波预处理, 探究了不同水平的超声预处理条件对花椰菜干制品品质的影响, 分析了其热风干燥过程中的水分状态及分布。在单因素实验的基础上, 以色泽、复水比、维生素 C 含量和 DPPH 自由基清除能力为响应值, 选取超声时间、超声频率和超声功率密度进行三因素三水平的响应面中心组合设计实验, 获得花椰菜干制品品质最佳的超声条件。结果表明, 花椰菜超声预处理最优工艺为: 超声时间 6.00 min, 超声频率 80 kHz, 超声功率密度 0.22 W/cm<sup>2</sup>。此条件下花椰菜干制品 *b*\* 值为 30.58, 复水比 2.97, Vc 含量为 311.78 mg/100 g, DPPH 自由基清除能力为 17.20 μmol Trolox/g。低场核磁共振 (LF-NMR) 结果发现, 花椰菜热风干燥过程中首先脱除的为自由水, 其次为半结合水及部分结合水; 且超声波处理后提高了花椰菜中氢质子自由度, 能够加快其干燥过程中水分脱除速率。因此, 响应面中心组合设计实验和 LF-NMR 技术可用于花椰菜干制品预处理工艺优化和干燥过程水分变化分析, 改善干制品品质, 提高生产效率。

**关键词:** 花椰菜; 超声波预处理; 工艺优化; 干燥; 水分状态

文章编号: 1673-9078(2022)05-199-208

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0866

## Optimization of Ultrasonic Pretreatment Process for Cauliflower and Analysis of Moisture Status during Drying

YANG Huizhen<sup>1,2</sup>, XIAO Yadong<sup>1,2\*</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, YANG Yiwen<sup>1,3</sup>, NIE Meimei<sup>1</sup>, SONG Jiangfeng<sup>1</sup>,  
LIU Chunquan<sup>1</sup>, LI Dajing<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

(2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** In this study, ultrasonic pretreatment of cauliflower was used before drying, and the effects of different levels of ultrasonic pretreatment conditions on the quality of dried cauliflower products were explored. Meantime, the moisture status and distribution of cauliflower during hot air drying were analyzed. Based on single-factor experiments, taking color, rehydration ratio, vitamin C content and DPPH free radical scavenging capacity as response values, ultrasonic time, ultrasonic frequency and ultrasonic power density were selected to perform a three-factor three-level response surface center combination design experiment. And the ultrasonic conditions with better quality of dried cauliflower products were obtained. The results showed that the optimal process for ultrasonic pretreatment of cauliflower was ultrasonic time 6.00 min, ultrasonic frequency 80 kHz, ultrasonic power density 0.22 W/cm<sup>2</sup>. Under these conditions, the *b*\* value of the dried cauliflower product was 30.58, the rehydration ratio was 2.97, the Vc content was 311.78 mg/100 g, and the DPPH free radical scavenging ability was

引文格式:

杨慧珍, 肖亚冬, 王娟, 等. 花椰菜超声波预处理工艺优化及干燥过程中水分状态分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 199-208

YANG Huizhen, XIAO Yadong, WANG Juan, et al. Optimization of ultrasonic pretreatment process for cauliflower and analysis of moisture status during drying [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 199-208

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)重点项目(BE2018382)

作者简介: 杨慧珍(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: yzhyanghuizhen@126.com

通讯作者: 肖亚冬(1988-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬精深加工与品质调控, E-mail: xiaoyadong2016@163.com

17.20  $\mu\text{mol Trolox/g}$ . The results of low-field nuclear magnetic resonance found that free water was firstly removed during the process of hot air drying of cauliflower, followed by semi-bound water and partially bound water. After ultrasonic pretreatment, the degree of freedom of hydrogen protons in cauliflower was increased, so the water removal rate could be accelerated during the drying process. Therefore, to improve the quality of dried cauliflower products and reduce drying time, the response surface center combined design experiment and LF-NMR technology can be used to optimize the pretreatment process of dried cauliflower products and analyze the moisture changes during drying.

**Key words:** cauliflower; ultrasonic pretreatment; process optimization; drying; moisture state

花椰菜 (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) 又名花菜、菜花, 是一种十字花科芸薹属植物, 富含纤维素、生物碱类、黄酮类和硫代葡萄糖苷等多种营养物质, 主要种植在我国沿海和高海拔地区<sup>[1,2]</sup>。新鲜花椰菜含水量大、不易储存, 严重降低其经济和食用价值<sup>[3,4]</sup>。干制可减少果蔬中的水分, 降低其水分活度, 提高果蔬营养品质, 便于贮藏和运输<sup>[5]</sup>。因此, 通过将新鲜花椰菜进行脱水干制, 可有效减少损失, 提高其商品价值。

干燥前选择合适的预处理方式, 有助于提高干燥速率, 降低干燥过程对干制品品质产生的不利影响。目前, 超声波技术在果蔬干制或冻结前的预处理中得到了较为广泛的应用, 它具有加快干燥速率、改善干制品品质、增加固体物质扩散等优点。王海鸥等<sup>[6]</sup>研究发现超声处理可改善真空冻结草莓片的失水率, 且影响程度为超声波功率>超声波频率>超声波处理时间。Kek 等<sup>[7]</sup>发现与未处理相比, 超声处理后番石榴的干燥时间减少了 17%~33%, 并且改善了番石榴干制品品质。Cao 等<sup>[8]</sup>发现, 超声处理不仅可以缩短干燥大麦草的时间、降低干燥所需能耗, 还可减少大麦草中的微生物含量, 保留营养成分, 改善风味。

果蔬中的水分通常包括自由水、半结合水和结合水, 随着干燥过程的进行, 果蔬中水分被去除的同时其状态也会发生变化。低场核磁共振 (LF-NMR) 是一种能够在无损状态下快速、准确检测果蔬中水分状态及分布的新型技术, 其中, 弛豫时间  $T_2$  是低场核磁共振检测结果中的重要指标, 它反映了被检测材料中的水分分布情况,  $T_2$  值越高则表示水的流动性越强。Sun 等<sup>[9]</sup>采用 LF-NMR 术监测了覆盆子干燥过程中的水分状态和变化, 发现结合水含量变化不明显, 但其比例逐渐增加, 非流动水和自由水含量显著降低。Kamal 等<sup>[10]</sup>对苹果片的干燥过程进行了研究, 发现采用 LF-NMR 技术能够快速检测到其中的自由水含量变化。因此, 通过 LF-NMR 技术来分析花椰菜干燥过程中的水分分布情况及变化规律, 对于改善干制品品质、优化干燥工艺具有重要意义。

因此, 本研究以花椰菜为原料, 对超声波预处理过程中的关键单因素进行实验, 并采用响应面中心组

合设计试验优化超声波预处理参数, 通过建立回归模型获得超声波预处理最优工艺参数, 同时运用 LF-NMR 技术比较超声波处理前后热风干燥过程中花椰菜样品中水分分布情况, 进一步明确超声波预处理对花椰菜干燥过程中水分变化的影响, 为高品质花椰菜干制品加工制造提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

新鲜有机花椰菜购于南京市玄武区孝陵卫农贸市场。花椰菜大小 (20 cm×20 cm×15 cm)、成熟度基本一致, 于 2~4 °C 冰箱中冷藏待用。使用前尽量将其分割为长×宽×高约 2 cm×2 cm×2 cm 大小的块茎。

### 1.2 实验试剂

Folin 酚试剂, 上海麦克林生化科技有限公司; 草酸、磷酸、碳酸钠、酒石酸钾钠, 南京化学试剂股份有限公司; 氢氧化钠、乙酸, 西陇化工股份有限公司; 苯酚, 成都市科龙化工试剂厂; 无水乙醇、甲醇、葡萄糖、碳酸氢钠、牛血清白蛋白、浓硫酸、亚硝酸钠、硝酸铝、3,5-二硝基水杨酸、亚硫酸钠、双氧水、氯化钠 (均为分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 没食子酸、L(+)-抗坏血酸、芦丁标准品, 上海源叶生物科技有限公司; 2,6-二氯酚靛酚、考马斯亮蓝 G-250, 上海蓝季科技发展有限公司; 结晶酚, 北京索莱宝科技有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH)、Trolox, 东京化成工业发展有限公司; 水杨酸, 上海凌峰化学试剂有限公司; 七水合硫酸亚铁, 汕头市西陇化工厂有限公司; 葡萄糖测定试剂盒、总抗氧化能力 (T-AOC) 测定试剂盒, 南京建成生物工程公司。

### 1.3 仪器与设备

BS-224-S 万分之一分析天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; CM-700d1 全自动手持色差计, 日本柯尼卡美能达公司; UV-6300 型紫外分光光度计, 上海美普达仪器有限公司; MesoMR23-060H-I 核磁共振仪, 苏州纽迈电子科技有限公司; KQ-S1000VDE

型三频数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; DHG-9073B5 型电热恒温鼓风箱, 上海新苗医疗器械制造有限公司; FW100 高速万能粉碎机, 天津市泰斯特仪器有限公司。

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 工艺流程

新鲜花椰菜→清洗→切分(2 cm×2 cm×2 cm)→超声波预处理→热风干燥(干燥温度 70 °C, 干燥至湿基水分含量<8%)→花椰菜干制品

### 1.4.2 超声波预处理条件参数的单因素实验

根据王娟等<sup>[1]</sup>不同预处理后花椰菜干制品品质分析的研究表明, 超声预处理效果更好, 因此, 本部分研究选择超声时间、超声频率和超声功率密度三个因素进行单因素实验, 因素水平见表 1, 分别考察其对花椰菜干制品  $b^*$  值、复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力的影响, 其中各因素各水平均是在相同

表 1 超声波预处理因素水平表

Table 1 Factors and levels in the single factor design

因素	水平						
超声时间/min	0	5	10	15	20	25	
超声频率/kHz	45		80		100		
超声功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	0.22	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50	0.55

### 1.4.3 超声波预处理工艺响应面优化实验

选取超声时间、超声频率和超声功率密度作为自变量,  $b^*$  值、复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力作为响应值, 进行花椰菜超声波预处理三因素三水平响应面实验设计及实验, 并且各实验条件均是在相同恒定温度下进行, 实验结果详见结果与讨论部分。

### 1.4.4 LF-NMR 技术分析水分状态

#### 1.4.4.1 弛豫时间的测定

样品制备: 新鲜花椰菜清洗切块沥干, 取一部分经超声频率为 80 kHz、超声功率密度为 0.22 W/cm<sup>2</sup> 超声 6 min 后, 将未预处理与超声波处理后的样品置于 70 °C 的热风干燥箱内干燥。选取新鲜花椰菜以及水分含量为 60%、40%、20%、8% 的花椰菜样品, 共计 9 个实验样品, 以低场核磁共振技术的横向弛豫行为测定干燥过程中花椰菜样品的水分状态。

测定方法: 将花椰菜样品放入 25 mm 的 NMR 专用试管中, 然后将试管置于磁场中心位置的射频线圈中心, 利用 CPMG 脉冲序列测定得到花椰菜横向弛豫时间  $T_2$ , 主要参数设置为: 磁体温度 32 °C, 主频 23 MHz, 偏移频率 399424.9 Hz, 90 度脉冲时间 9  $\mu$ s, 180 度脉冲时间 18  $\mu$ s, 累积采样次数 450016, 重复时间 5000 ms, 回波时间 0.15 ms, 回波个数 15000, 谱

恒定温度下进行, 详细实验设计如下:

(1) 选定超声频率和超声功率密度分别为 45 kHz、0.22 W/cm<sup>2</sup>, 考察不同超声时间对花椰菜干制品品质的影响, 超声时间分别为 5、10、15、20、25 min, 以超声时间 0 min 即未超声处理干燥花椰菜作为空白对照。

(2) 选定超声时间和超声功率密度分别为 10 min、0.22 W/cm<sup>2</sup>, 考察不同超声频率对花椰菜干制品品质的影响, 超声频率分别为 45、80、100 kHz, 以超声频率 0 kHz 即未超声处理干燥花椰菜作为空白对照。

(3) 选定超声时间和超声频率分别为 10 min、45 kHz, 考察不同超声功率密度对花椰菜干制品品质的影响, 超声功率密度分别为 0.22、0.28、0.33、0.39、0.44、0.50、0.55 W/cm<sup>2</sup>, 以超声功率密度 0 W/cm<sup>2</sup> 即未超声处理干燥花椰菜作为空白对照。

宽 200 kHz。

#### 1.4.4.2 MRI 成像分析

超声波预处理后的花椰菜分别热风干燥至含水率为 60%±2%、40%±2%、20%±2%、8%±2%, 选取鲜样以及上述水分含量的花椰菜样品, 利用 LF-NMR 成像软件对样品进行成像实验。MRI 成像分析参数设置: 回波时间 30 ms, 重复时间 500 ms, 矩阵为 256×256。

## 1.5 指标测定

### 1.5.1 含水率

参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》<sup>[12]</sup>进行花椰菜中含水率的测定。

### 1.5.2 色泽

采用手持式色差计, 对干燥前和干燥后花椰菜的黄绿值  $b^*$  进行测定, 其中  $b^*$  值偏黄为正数值, 偏蓝为负数值。

### 1.5.3 复水比

将一定质量的花椰菜干制品放入装满蒸馏水的烧杯中, 将其置于 25 °C 恒温水浴锅中进行复水操作, 20 min 后用滤纸吸干花椰菜的水分<sup>[13]</sup>。复水比可按公式 (1) 计算:

$$\text{复水比} = \frac{m_1}{m_0} \quad (1)$$

式中:

$m_0$ —花椰菜干制品的质量, g;

$m_1$ —复水后花椰菜的质量, g。

### 1.5.4 维生素 C 含量

参考 GB 5009.86-2016《食品中抗坏血酸的测定》<sup>[14]</sup>中的 2,6-二氯酚滴定法。

### 1.5.5 DPPH 自由基清除能力

首先将花椰菜干制品打粉,称取花椰菜粉溶于 95%无水乙醇中,反复超声浸提、离心,定容至 50 mL。将 2 mL 样品提取液与 2 mL 0.16 mmol/L DPPH 溶液 (DPPH 溶解在 95%乙醇中,在 3.5 h 内使用完)混合均匀后于室温条件下避光反应 30 min,在 517 nm 处比色得到吸光度值  $A_i$ ,以蒸馏水代替样品溶液为对照,得到吸光度值  $A_0$ ,同时将 2 mL 样品提取液和 2 mL 95%乙醇溶液混合均匀后,测定吸光度  $A_j$ ,根据式(2)计算 DPPH 自由基的清除率<sup>[15]</sup>。以 Trolox 为对照,按照上述方法绘制标准曲线为  $y=0.9538x+3.9137$  ( $R^2=0.9940$ ),根据标准曲线计算 DPPH 自由基清除能力。

$$\text{清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_i - A_j)}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

### 1.6 数据统计与分析

各个指标平行测定三次,采用 Design Expert 8.0 统计分析软件进行响应面分析,利用 Origin 9.0 软件作图,采用 SPSS 25.0 软件进行方差分析和 Duncan 检验法进行显著性分析,显著水平  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同单因素对花椰菜干制品品质的影响

#### 2.1.1 超声时间对花椰菜干制品品质的影响

表 2 不同超声时间对花椰菜干制品品质的影响

Table 2 Effects of different ultrasonic time on the quality of dried cauliflower products

超声时间/min	$b^*$ 值	复水比/(g/g)	Vc 含量/(mg/100 g)	DPPH 自由基清除能力/( $\mu\text{mol Trolox/g}$ )
0	33.66 $\pm$ 1.04 <sup>d</sup>	2.80 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	64.38 $\pm$ 2.54 <sup>c</sup>	7.07 $\pm$ 0.76 <sup>c</sup>
5	41.85 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>	3.10 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	258.76 $\pm$ 3.96 <sup>a</sup>	11.86 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>
10	41.99 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>	3.16 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	257.93 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	11.72 $\pm$ 0.73 <sup>a</sup>
15	39.52 $\pm$ 0.96 <sup>b</sup>	3.04 $\pm$ 0.10 <sup>ab</sup>	219.74 $\pm$ 6.95 <sup>b</sup>	8.98 $\pm$ 0.55 <sup>b</sup>
20	41.43 $\pm$ 0.70 <sup>a</sup>	2.95 $\pm$ 0.13 <sup>ab</sup>	204.00 $\pm$ 3.98 <sup>c</sup>	8.61 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>
25	37.81 $\pm$ 1.37 <sup>c</sup>	2.98 $\pm$ 0.18 <sup>ab</sup>	175.43 $\pm$ 6.15 <sup>d</sup>	8.45 $\pm$ 0.98 <sup>b</sup>

注:平均值 $\pm$ 标准差;同列小写字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ),同列小写字母相同表示差异不显著 ( $p > 0.05$ );下同。

不同超声时间预处理花椰菜干燥后  $b^*$ 值、复水比、Vc 和抗氧化活性的变化如表 2 所示。由表 2 可知,随着超声处理时间的增加,花椰菜干制品  $b^*$ 值逐渐降低,与未处理样品色泽更接近,说明超声长时间处理更有利于花椰菜干制品色泽的保持。不同超声时间处理后花椰菜干制品复水比无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),均高于未处理样品,随着时间的增加,复水比先增大后减少,超声处理 10 min 时达到最大值,为 3.16,超声处理 15 min~25 min 与未处理样品之间无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

如表 2 所示,超声波处理 5 min 和 10 min 后,花椰菜干制品中 Vc 含量较高,分别为 258.76 mg/100 g 和 257.93 mg/100 g,二者之间无显著性差异 ( $p > 0.05$ );随着超声处理时间的增加,花椰菜干制品中 Vc 含量逐渐降低;而未经超声处理的花椰菜干制品中 Vc 含量显著低于超声处理后样品 ( $p < 0.05$ ),原因可能有两个方面:首先,经过超声波预处理后花椰菜中细胞发生破裂,其中的 Vc 更易提取,含量也会高于未预处理样品<sup>[16]</sup>;其次,超声波预处理会使植物细胞膜通透性变大,利于水分的蒸发,导致干燥时间缩短,从而减少了物料在高温作用下的时间,使得 Vc 等热敏性成分的保留率提高。同时随着超声处理时间增加,花椰菜在热水溶液中停留时间变长,易溶于水的 Vc 含量就逐渐降低。与 Vc 含量变化类似,随着超声处理时间的增加,花椰菜干制品的 DPPH 自由基清除能力逐渐降低,其中超声处理 5 min 后其抗氧化活性最强,为 11.86  $\mu\text{mol Trolox/g}$ ,与处理 10 min 样品之间无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

良好的色泽、较强的复水能力及营养成分高保留是判断干制蔬菜品质的重要指标,由上述结果可知,花椰菜干燥前进行超声处理 5 min 或 10 min 均可获得较好的色泽、复水比和保留较多的 Vc 及高 DPPH 自由基清除能力。

表3 不同超声频率对花椰菜干制品品质的影响

Table 3 Effects of different ultrasonic frequency on the quality of dried cauliflower products

超声频率/kHz	<i>b</i> *值	复水比/(g/g)	Vc 含量/(mg/100 g)	DPPH 自由基清除能力/( $\mu$ mol Trolox/g)
0	33.66 $\pm$ 1.04 <sup>b</sup>	2.80 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	64.38 $\pm$ 2.54 <sup>c</sup>	7.07 $\pm$ 0.76 <sup>b</sup>
45	41.99 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>	3.16 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	257.93 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	11.72 $\pm$ 0.73 <sup>a</sup>
80	42.94 $\pm$ 1.32 <sup>a</sup>	3.27 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>	252.31 $\pm$ 4.51 <sup>a</sup>	11.04 $\pm$ 0.90 <sup>a</sup>
100	42.07 $\pm$ 2.42 <sup>a</sup>	3.08 $\pm$ 0.17 <sup>a</sup>	223.74 $\pm$ 6.92 <sup>b</sup>	10.76 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>

表4 不同超声功率密度对花椰菜干制品品质的影响

Table 4 Effects of different ultrasonic power densities on the quality of dried cauliflower products

超声功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	<i>b</i> *值	复水比/(g/g)	Vc 含量/(mg/100 g)	DPPH 自由基清除能力/( $\mu$ mol Trolox/g)
0	33.66 $\pm$ 1.04 <sup>c</sup>	2.80 $\pm$ 0.18 <sup>d</sup>	64.38 $\pm$ 2.54 <sup>f</sup>	7.07 $\pm$ 0.76 <sup>c</sup>
0.22	41.99 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>	3.16 $\pm$ 0.15 <sup>ab</sup>	257.93 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	11.72 $\pm$ 0.73 <sup>a</sup>
0.28	43.02 $\pm$ 1.40 <sup>a</sup>	3.11 $\pm$ 0.05 <sup>abc</sup>	240.04 $\pm$ 8.55 <sup>b</sup>	10.58 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>
0.33	43.60 $\pm$ 1.21 <sup>a</sup>	3.21 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	237.07 $\pm$ 3.67 <sup>b</sup>	10.37 $\pm$ 0.94 <sup>b</sup>
0.39	41.40 $\pm$ 1.11 <sup>ab</sup>	3.01 $\pm$ 0.04 <sup>abcd</sup>	236.61 $\pm$ 6.81 <sup>b</sup>	10.19 $\pm$ 0.62 <sup>b</sup>
0.44	40.71 $\pm$ 1.22 <sup>ab</sup>	2.98 $\pm$ 0.07 <sup>bcd</sup>	222.84 $\pm$ 9.86 <sup>c</sup>	9.84 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>
0.50	39.05 $\pm$ 1.11 <sup>b</sup>	2.94 $\pm$ 0.12 <sup>cd</sup>	208.26 $\pm$ 7.13 <sup>d</sup>	9.76 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>
0.55	37.40 $\pm$ 1.09 <sup>c</sup>	2.86 $\pm$ 0.12 <sup>d</sup>	190.72 $\pm$ 6.84 <sup>e</sup>	9.61 $\pm$ 0.40 <sup>b</sup>

### 2.1.2 超声频率对花椰菜干制品品质的影响

不同超声频率处理对花椰菜干燥后 *b*\*值、复水比、Vc 和抗氧化活性的影响如表 3 所示。由表可知,不同超声频率对花椰菜干制品的色泽和复水比无显著性影响 ( $p>0.05$ );随着超声频率的增加干制花椰菜中 Vc 含量先增加后减少,超声频率为 45 kHz 时花椰菜干制品中 Vc 含量最高,为 257.93 mg/100 g,与超声频率 80 kHz 时花椰菜干制品中 Vc 含量无显著性差异 ( $p>0.05$ );不同超声频率对花椰菜干制品的 DPPH 自由基清除能力无显著性影响 ( $p>0.05$ )。由以上结果可知,选择 45 kHz 或 80 kHz 对花椰菜进行超声波预处理均可。

### 2.1.3 超声功率密度对花椰菜干制品品质的影响

不同超声功率密度对干制花椰菜 *b*\*值、复水比、Vc 和抗氧化活性的影响如表 4 所示。由表可知,不同超声功率密度对花椰菜干制品的四个重要品质均有显著性影响 ( $p<0.05$ )。随着超声功率密度的增加花椰菜干制品的 *b*\*值和复水比先增加后减少,超声功率密度为 0.33 W/cm<sup>2</sup> 时二者均达到最大值,分别为 43.60 和 3.21,但与超声功率为 0.22 W/cm<sup>2</sup> 时无显著性差异 ( $p>0.05$ );随着超声功率密度的增加花椰菜干制品 Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力变化一致,均先增加后减少,在超声功率密度为 0.22 W/cm<sup>2</sup> 时达到最大值,分别为 257.93 mg/100 g 和 11.72  $\mu$ mol Trolox/g。综上,超声波功率密度为 0.22 W/cm<sup>2</sup> 较为合适。

## 2.2 响应面优化超声波预处理最佳工艺

表5 响应面中心组合设计实验变量与编码表

Table 5 Response surface center combination design experiment

水平	因素		
	时间/min	频率/kHz	功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )
-1	5	45	0.22
0	10	80	0.33
1	15	100	0.44

以上述单因素试验结果为基础,采用响应面法进行花椰菜干燥前超声波处理优化实验,测定花椰菜干制品 *b*\*、复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力,中心组合设计因素水平及结果如表 5 和表 6 所示。

### 2.2.1 响应面优化实验结果分析

使用 Design Expert 8.0 软件对实验结果进行拟合分析,得到各个实验因素对响应值影响的二次回归方程如下:

$$b^* \text{ 值} = 31.27 - 4.88A + 1.63B + 2.89C + 0.12AB + 7.96AC - 2.19BC - 6.68A^2 + 5.72B^2 + 3.35C^2$$

$$\text{复水比} = 3.55 - 0.08A - 0.08B - 8.75E - 0.03C + 0.03AB - 0.12AC + 0.03BC - 0.27A^2 - 0.36B^2 - 0.15C^2$$

$$Vc = 186.70 - 6.44A - 0.05B - 3.03C - 33.07AB + 25.90AC - 16.65BC + 44.47A^2 + 24.74B^2 + 34.98C^2$$

$$\text{DPPH 自由基清除能力} = 9.97 - 2.28A + 0.67B + 0.59C - 2.05AB + 1.89AC - 1.68BC + 0.63A^2 + 1.88B^2 + 1.78C^2$$

其中 A、B、C 分别代表超声时间、超声频率和超声功率密度,方程中的各项系数表示各因素对 *b*\*值、复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力的影响情况。

表6 试验设计及结果

Table 6 Experimental designs and results

序号	超声时间/min	频率/kHz	超声密度/(W/cm <sup>2</sup> )	b*	复水比/(g/g)	Vc/(mg/100 g)	DPPH/(μmol Trolox/g)
1	-1	1	0	29.54	2.75	281.77	17.64
2	1	1	0	29.98	2.87	220.96	7.88
3	0	0	0	30.41	3.57	186.71	9.97
4	1	-1	0	29.48	3.03	296.17	11.42
5	1	0	1	28.60	2.87	288.36	13.36
6	1	0	-1	29.87	3.00	212.82	7.92
7	-1	0	-1	30.41	3.15	295.72	15.17
8	0	1	1	29.58	2.96	216.27	13.37
9	0	-1	-1	30.28	3.19	243.25	10.53
10	0	0	0	30.57	3.68	186.70	9.97
11	0	-1	1	29.46	2.99	240.70	14.59
12	0	1	-1	30.54	3.04	285.43	16.02
13	0	0	0	30.91	3.41	185.70	9.97
14	-1	0	1	30.09	3.49	267.66	13.04
15	0	0	0	30.27	3.55	186.70	9.97
16	0	0	0	30.33	3.54	183.70	8.97
17	-1	-1	0	30.88	3.03	224.71	12.98

表7 回归系数及变量分析

Table 7 Regression coefficient and variable analysis

系数项	b*	复水比	Vc/(mg/100 g)	DPPH/(μmol Trolox/g)
Intercept	31.27	3.55	186.70	9.97
A	-4.89**	-0.08	-6.44	-2.28***
B	1.63	-0.08	-0.05	0.67**
C	2.89	-0.01	-3.03	0.59*
AB	0.12	0.03	-33.07**	-2.05***
AC	7.96**	-0.12	25.90**	1.89***
BC	-2.20	0.03	-16.65	-1.68***
A <sup>2</sup>	-6.68**	-0.27***	44.47***	0.63
B <sup>2</sup>	5.72*	-0.36***	24.74**	1.88***
C <sup>2</sup>	3.35	-0.15*	34.98***	1.78***
R <sup>2</sup>	0.82	0.90	0.91	0.97

注: \*显著水平  $p < 0.05$ , \*\*显著水平  $p < 0.01$ , \*\*\*显著水平  $p < 0.001$ ; A 为超声时间, B 为超声频率, C 为超声功率密度。

为检验方程是否有效, 对上述回归模型进行方差分析, 结果如表 7 所示。其中, 复水比和 Vc 含量模型显著 ( $p < 0.05$ ), DPPH 自由基清除能力模型极显著 ( $p < 0.001$ ),  $b^*$  值模型不显著 ( $p > 0.05$ ); Vc 和 DPPH 方程的决定系数  $R^2 > 0.9$ ,  $b^*$  值和复水比方程的决定系数  $R^2$  接近于 0.9, 说明本试验中所建方程有意义。

由表 7 可知, 影响花椰菜干制品  $b^*$  值的顺序为超声时间 > 超声功率密度 > 超声频率, 其中仅超声时间对花椰菜干制品  $b^*$  值具有显著性影响 ( $p < 0.05$ ); 超声时间、超声频率和超声功率密度对花椰菜干制品的复

水性和 Vc 含量均无显著性影响 ( $p > 0.05$ ); 影响花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力的顺序为超声时间 > 超声频率 > 超声功率密度, 其中超声时间和超声频率对花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力具有极显著影响 ( $p < 0.001$ ), 超声功率密度具有显著影响 ( $p < 0.05$ )。以上结果由图 1~3 各因素对  $b^*$  值、复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力的交互作用也可验证。

由图 1 可知, 超声时间对花椰菜干制品  $b^*$  值影响显著 ( $p < 0.05$ ), 超声频率和超声功率密度对花椰菜干制品  $b^*$  值无显著性影响 ( $p > 0.05$ )。随着超声时间的

增加,花椰菜干制品的  $b^*$  值先增加再减少。随着超声频率和超声功率密度的增加,花椰菜干制品的  $b^*$  值逐渐增加。

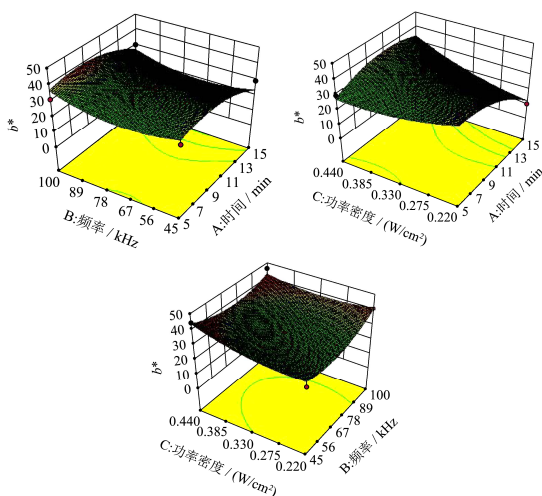


图 1 各因素的交互作用对  $b^*$  值的影响

Fig.1 The influence of the interaction of various factors on the

value of  $b^*$

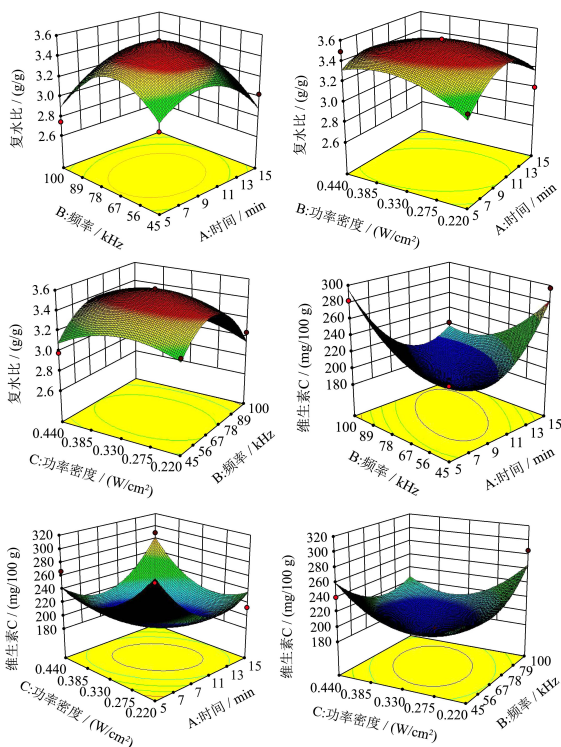


图 2 各因素的交互作用对复水比和  $V_c$  含量的影响

Fig.2 The influence of the interaction of various factors on the

rehydration ratio and vitamin C content

对比图 2 与表 7 的方差分析结果可知,进一步验证了超声时间、超声频率和超声功率密度对花椰菜干制品复水比和  $V_c$  含量均无显著性影响 ( $p>0.05$ ),但随着超声条件的变化,二者均表现出一定的变化趋势。其中,花椰菜干制品的复水比随着超声时间、超声频率和超声功率密度的增加均先增加再减少,  $V_c$  含量随

着超声时间、超声频率和超声功率密度的增加先减少再增加。

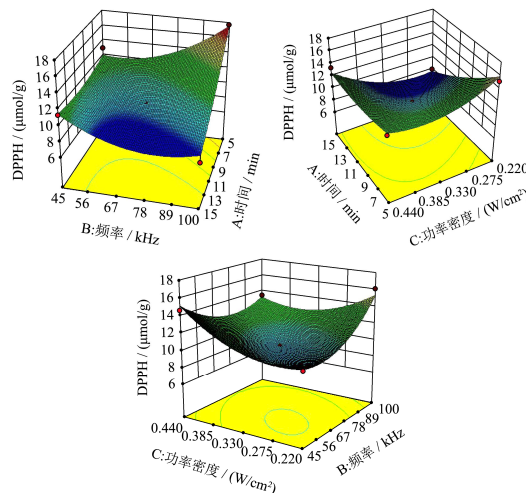


图 3 各因素的交互作用对 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig.3 The influence of the interaction of various factors on

DPPH radical scavenging ability

由图 3 可知,超声时间对花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力影响极显著 ( $p<0.001$ ),超声频率对花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力影响极显著 ( $p<0.01$ ),超声功率密度对花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力影响显著 ( $p<0.05$ )。花椰菜干制品 DPPH 自由基清除能力随着超声时间、超声频率和超声功率密度的增大而增大。

由此可知,不同超声处理条件对花椰菜干制品感官特性和营养品质影响不同。其中,长时间的超声作用致使花椰菜温度逐渐升高,造成花椰菜氧化程度增大,花椰菜干制品的色泽变差,并且高温以及超声水中的氧分子导致抗氧化活性物质降解<sup>[17,18]</sup>。适当的超声波空化作用会引起果蔬细胞被破坏,抗氧化活性物质更易提取,而随着超声频率的增加,其空化作用减少,提取到的抗氧化活性物质也随之减少<sup>[19]</sup>。另外,声强随着超声波功率的增加而增加。郭庆启等<sup>[20]</sup>采用超声波提取落叶松树皮中的多酚物质时发现,随着超声波功率的增加,多酚提取率增加,但当超过 350 W 后,多酚得率下降,分析原因可能是过高的超声功率导致多酚稳定性下降。因此,适当的超声波功率对花椰菜产生的作用会使其中抗氧化活性物质较快溶出,能够获得干制品较高的抗氧化能力,但过大的超声波功率密度导致抗氧化活性物质不稳定而被破坏,抗氧化能力随之降低。因此,选择合适的超声条件是获得高品质花椰菜干制品的重要前提。

### 2.2.2 响应面实验优化结果及验证

色泽和营养是评价脱水蔬菜的重要指标。利用 Design Expert 软件对各评价指标进行优化,以  $b^*$  值、

复水比、Vc 含量和 DPPH 自由基清除力为标准, 获得花椰菜干燥前超声波预处理最优工艺条件为: 超声时间 6.22 min, 超声频率 83.98 kHz, 超声功率密度 0.22 W/cm<sup>2</sup>。结合实际操作条件和设备可设置参数, 最终将花椰菜干燥前超声波预处理的条件修正为超声时间 6 min, 超声频率 80 kHz, 超声功率密度 0.22 W/cm<sup>2</sup>。采用修正后的条件进行验证实验, 结果如表 8 所示, b\*值、Vc 含量和 DPPH 自由基清除能力的实验验证值大于预测值, 复水比的实验验证值与预测值相近, 说明该模型合理可靠。

表 8 验证性实验  
Table 8 Verification test

条件	b*值	复水比 (/g/g)	Vc (/mg/100 g)	DPPH (/μmol Trolox/g)
理论值	30.17	3.11	296.17	16.62
验证值	30.58	2.97	311.78	17.20

### 2.3 超声波预处理花椰菜干燥过程中水分变化分析

化分析

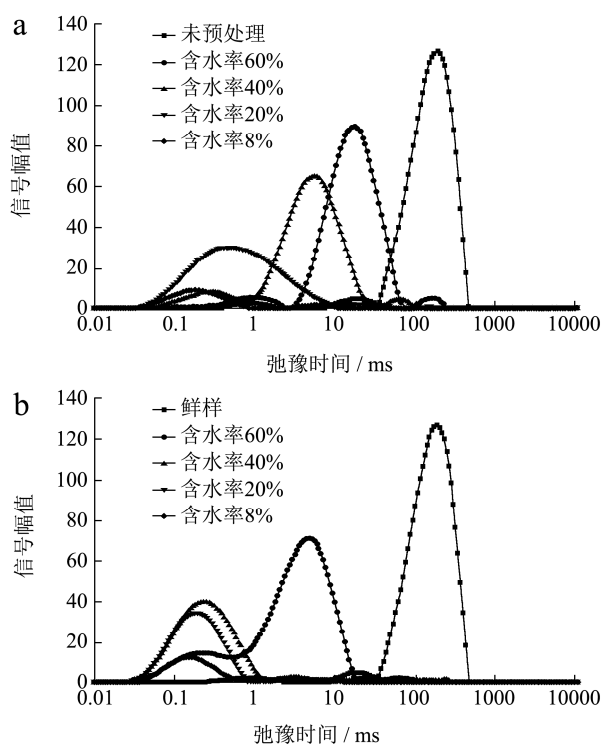


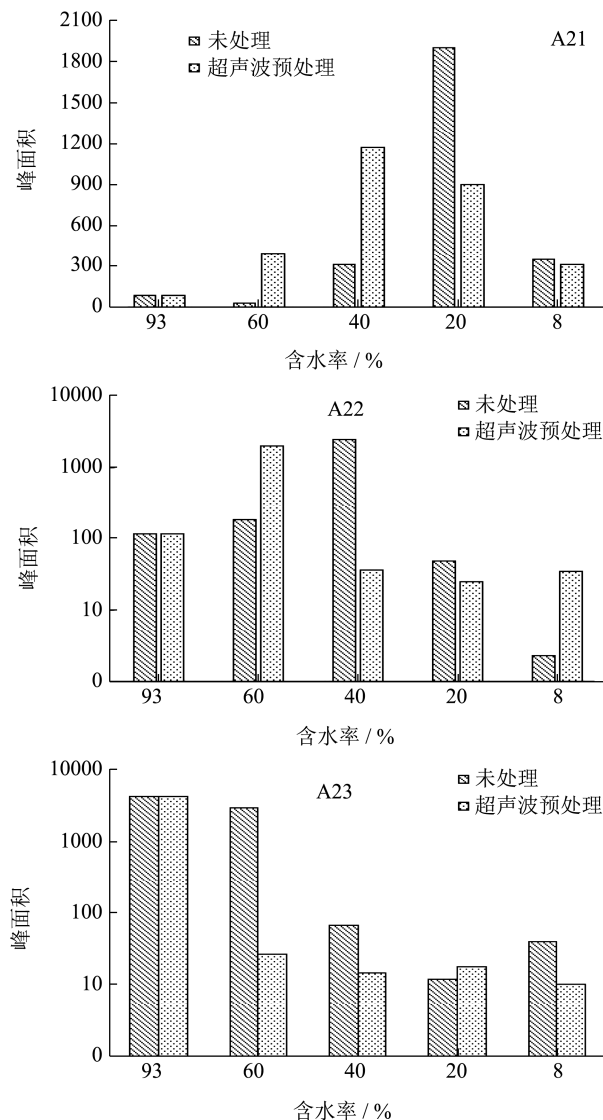
图 4 花椰菜在热风干燥过程中的 T<sub>2</sub> 反演图谱

Fig.4 T<sub>2</sub> inversion spectrum of cauliflower during hot air drying

注: a: 未预处理样品的 T<sub>2</sub> 反演图谱; b: 超声波处理样品的 T<sub>2</sub> 反演图谱。

根据细胞中水的流动性性质, 植物组织中的水分可

分为三种形式, 即结合水 (T<sub>21</sub>)、半结合水 (T<sub>22</sub>) 和自由水 (T<sub>23</sub>)<sup>[21]</sup>, 分别对应 A<sub>21</sub>、A<sub>22</sub> 和 A<sub>23</sub> 的峰面积, 其中不同状态水分的相对含量由峰面积的大小代表, A 则表示三种不同水状态峰面积之和<sup>[22]</sup>。图 4 和图 5 分别为未经预处理和经超声波预处理后花椰菜热风干燥过程中的 T<sub>2</sub> 反演图谱和不同状态水分峰面积变化。由图可知, 随着干燥的进行, T<sub>2</sub> 反演图谱逐渐向左移动, 峰信号幅值逐渐减小, 峰面积也逐渐减小, 这是因为干燥温度可为花椰菜样品中的水分提供能量, 减弱水分子与细胞间的吸附能力, 水分的迁移能力提高。其中, T<sub>23</sub> 比 T<sub>21</sub>、T<sub>22</sub> 变化更明显, 说明主要脱除的水分是自由水。从图 5 不同水分状态峰面积和总峰面积变化可知, 随着干燥过程的进行, 自由水相对含量逐渐降低, 结合水和半结合水含量变化无规律, 这说明在干燥过程中花椰菜内部的自由水先被去除, 半结合水在自由水与结合水两种状态下相互转化。





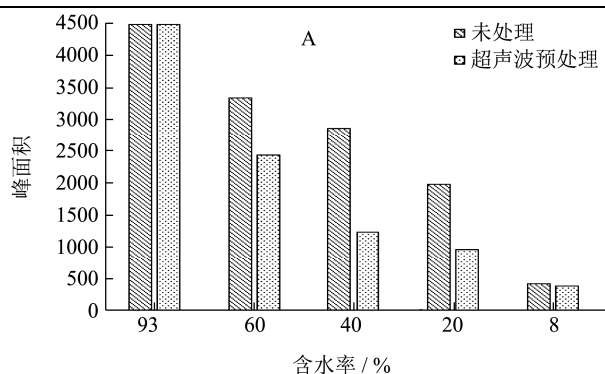


图5 花椰菜热风干燥过程中不同状态水分峰面积的变化

Fig.5 Changes in the peak area of different water states during the hot air drying of cauliflower

注: 图中  $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 、 $A_{23}$  和 A 分别对应结合水 ( $T_{21}$ )、半结合水 ( $T_{22}$ )、自由水 ( $T_{23}$ ) 及总含水量的峰面积, 其中  $A_{22}$  和  $A_{23}$  纵坐标为对数刻度。

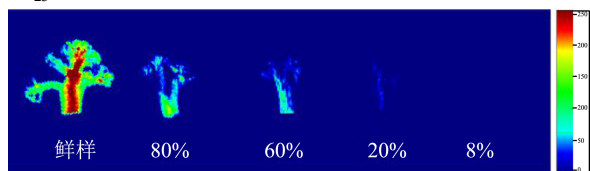


图6 热风干燥过程中花椰菜 MRI 图像变化

Fig.6 Changes of MRI images of cauliflower in different drying method

宋悦等<sup>[23]</sup>研究超声辅助渗透黄桃干燥过程中的水分变化发现, 超声处理使桃片微观结构发生变化, 细胞收缩, 形成微孔通道, 有利于其中水分扩散, 导致  $T_{23}$  和  $T_{21}$  降低, 弛豫时间减少, 进而利于后期干燥过程水分的去除。许方方<sup>[24]</sup>分析了烫漂处理对西兰花中水分状态及分布的影响, 结果表明烫漂预处理可增加物料内部水分的自由度进而提高干燥速率。由图 4 和图 5 可知, 同一含水率下, 与未预处理样品相比, 超声波处理花椰菜干燥样品中的  $T_2$  反演图谱均向左移动且总含水量的峰面积低于未预处理样品, 这可能是因为超声作用同样诱导了花椰菜内部形成微通道并使细胞结构破裂, 促进了水分从内部向表面扩散的同时提高水分自由度, 结合水和不易流动水可迁移到细胞质中, 部分结合水和不易流动水被脱除<sup>[25,26]</sup>。

在 MRI 成像中, 红色成像颜色表示较高的水分含量, 蓝色则表示较低的水分含量。由图 6 可知, 新鲜花椰菜的主茎部分含有较多的水分, 花及侧茎部分水分含量较少。随着干燥过程的进行, 含水率逐渐降低, 花椰菜中茎样的红色部分不断减少, 且逐渐被蓝绿色代替, 当水分含量低于 60% 时, 花样部分颜色逐渐与背景色相同。且在干燥后期, 由于水分含量较低, 样品成像图与背景色融为一体, 已观察不到成像图, 说明花椰菜中的水分含量已经很低。

### 3 结论

不同超声波预处理单因素试验表明, 超声时间、超声频率和超声功率密度对花椰菜干制品品质有显著影响, 综合试验结果, 选择超声时间 10 min, 超声频率 80 kHz, 超声功率密度  $0.33 \text{ W/cm}^2$  为响应面实验优化条件的中心水平。经响应面中心组合设计实验及最优工艺修正, 获得的修正后花椰菜干燥前超声波预处理的最优工艺为: 超声时间 6 min, 超声频率 80 kHz, 超声功率密度  $0.22 \text{ W/cm}^2$ , 经验证实验, 此条件下花椰菜干制品  $b^*$  值为 30.58, 复水比 2.97, Vc 含量为  $311.78 \text{ mg/100 g}$ , DPPH 自由基清除能力为  $17.20 \mu\text{mol Trolox/g}$ 。经低场核磁共振检测发现, 花椰菜干燥过程中主要失去的是自由水, 经超声处理可提高其氢自由度, 加快自由水的脱除并去除部分半结合水和结合水。

### 参考文献

- [1] 朱焕焕.我国花椰菜种业发展现状、市场需求及研究热点综述[J].蔬菜,2019,4:30-35  
ZHU Huanhuan. Summary of the current situation, market demand and research hotspots of cauliflower seed industry in China [J]. Vegetables, 2019, 4: 30-35
- [2] 徐玉红.花椰菜的营养价值及保健作用[J].食品界,2018,4:94-95  
XU Yuhong. The nutritional value and health function of cauliflower [J]. Food Session, 2018, 4: 94-95
- [3] 天保.花椰菜与绿菜花的保鲜[J].农产品加工,2012,9:16-17  
TIAN Bao. Preservation of cauliflower and green cauliflower [J]. Processing of Agricultural Products, 2012, 9: 16-17
- [4] 刁小琴,关海宁,郭丽,等.花椰菜贮藏特性及保鲜技术发展方向[J].陕西农业科学,2010,56(5):36-37  
DIAO Xiaoqin, GUAN Haining, GUO Li, et al. Cauliflower storage characteristics and fresh-keeping technology development direction [J]. Shaanxi Agricultural Sciences, 2010, 56(5): 36-37
- [5] Wang Q, Li S, Han X, et al. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 107: 236-242
- [6] 王海鸥,陈守江,扶庆权,等.超声波处理对草莓片真空冻结失水特性与品质的影响[J].食品科技,2018,43(10):55-59  
WANG Haiou, CHEN Shoujiang, FU Qingquan, et al. Effect of ultrasonic treatment on water loss characteristics and quality of vacuum frozen strawberry slices [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(10): 55-59

- [7] Kek S P, Chin N L, Yusof Y A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices [J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(4): 495-506
- [8] Cao X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 333-340
- [9] Sun Y, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Pulse-spouted microwave freeze drying of raspberry: control of moisture using ANN model aided by LF-NMR [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 1-9
- [10] Kamal T, Song Y, Tan Z, et al. Effect of hot-air oven dehydration process on water dynamics and microstructure of apple (Fuji) cultivar slices assessed by LF-NMR and MRI [J]. Drying Technology, 2019, 37(15): 1974-1985
- [11] 王娟,肖亚冬,徐亚元,等.不同预处理方式对花椰菜干制品品质影响研究[J].食品工业科技,2020,41(24):36-43  
WANG Juan, XIAO Yadong, XU Yayuan, et al. Effect of different pretreatment methods on the quality attributes of dried cauliflower [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 36-43
- [12] GB 5009.3-2016,食品安全国家标准食品中水分的测定[S]  
GB 5009.3-2016, National Food Safety Standard Determination of Moisture in Food [S]
- [13] Wang H, Zhang M, Adhikari B. Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation [J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 507-517
- [14] GB 5009.86-2016,食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定[S]  
GB 5009.86-2016, National Food Safety Standard Determination of Ascorbic Acid in Food [S]
- [15] 赵岩岩,赵圣明,李帅,等.山楂叶多糖对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2020,41(2):73-79  
ZHAO Yanyan, ZHAO Shengming, LI Shuai, et al. Effect of polysaccharides from hawthorn leaves on the quality and antioxidant activity of fermented milk [J]. Food Science, 2020, 41(2): 73-79
- [16] Carranza-Concha J, Benloch M, Camacho M M, et al. Effects of drying and pretreatment on the nutritional and functional quality of raisins [J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(2): 243-248
- [17] 张迎敏,任广跃,屈展平,等.超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响[J].食品与机械,2019,35(12):194-201  
ZHANG Yingmin, REN Guangyue, QU Zhanping, et al. Effect of ultrasonic and blanching pretreatment on hot air drying of sweet potato leaves [J]. Food and Machinery, 2019, 35(12): 194-201
- [18] Teh S, Birch E J. Effect of ultrasonic treatment on the polyphenol content and antioxidant capacity of extract from defatted hemp, flax and canola seed cakes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1): 346-353
- [19] Golmohamadi A, Möller G, Powers J, et al. Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(5): 1316-1323
- [20] 郭庆启,张娜,孙瑶,等.超声波辅助提取落叶松树皮多酚的动力学和热力学研究[J].北京林业大学学报,2014,36(3):115-120  
GUO Qingqi, ZHANG Na, SUN Yao, et al. Kinetics and thermodynamics characteristics of ultrasonic assisted extraction polyphenols from larch bark [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 115-120
- [21] Xu 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] Li L, Zhang M, Yang P. Suitability of LF-NMR to analysis water state and predict dielectric properties of Chinese yam during microwave vacuum drying [J]. Food Science and Technology, 2019, 105: 257-264
- [23] 宋悦,金鑫,毕金峰,等.超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J].食品科学,2020,41(15): 177-185  
SONG Yue, JIN Xin, BI Jinfeng, et al. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on the quality characteristics of hot air dried and vacuum freeze dried yellow peach chips [J]. Food Science, 2020, 41(15): 177-185
- [24] 许方方.借助核磁共振技术研究西兰花内部的水分状态与分布及热风干燥对其的影响[D].苏州:苏州大学,2017  
XU Fangfang. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water using NMR methods [D]. Suzhou: Suzhou University, 2017
- [25] Teh S, Birch E J. Effect of ultrasonic treatment on the polyphenol content and antioxidant capacity of extract from defatted hemp, flax and canola seed cakes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1): 346-353
- [26] 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: 619-628

