

香菇脆热泵—瞬时压差膨化干燥工艺优化

Optimization of the processing parameters of shiitake (*Lentinus edodes*) crisps during heat pump coupled with instant controlled pressure drop puffing drying process

赵 亚 张越翔 徐 燕 石启龙

ZHAO Ya ZHANG Yue-xiang XU Yan SHI Qi-long

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

摘要:目的:针对真空油炸香菇脆片含油率高,长期食用存在健康隐患问题,开发优质非油炸香菇(整果)脆。方法:利用瞬时压差膨化(instant controlled pressure drop, DIC)技术,通过均匀设计,探究热泵预干燥含水率、膨化温度、真空干燥温度对香菇脆膨化度、复水比、总色差、硬度和脆度的影响,通过加权综合评分法构建多项式回归模型,优化求解并进行实验验证。结果:香菇脆 DIC 最优工艺参数为预干燥含水率 35.63%,膨化温度 100 °C,真空干燥温度 64.17 °C,此条件下的香菇脆膨化度为 69.34%,色差为 20.68,硬度为 108.16 N,脆度为 75.79。结论:均匀设计结合响应面可优化香菇脆 DIC 工艺,得到高品质非油炸香菇脆。

关键词:香菇脆;瞬时压差膨化;均匀设计;膨化度;品质特性

Abstract: Objective: The objective of this study was to develop high-quality non-fried whole shiitake (*Lentinus edodes*) crisps due to having high oil content of vacuum fried *L. edodes* crisps which inevitably pose health risks after long-term use. **Methods:** Based on uniform design, instant controlled pressure drop (DIC) was used to investigate the influences of moisture content after heat pump pre-drying, puffing temperature and vacuum drying temperature on the puffing degree, rehydration ratio, total color difference, hardness and crispness of *L. edodes* crisps. The polynomial regression model was established by using a weighted comprehensive score method, and it was optimized and verified

基金项目:山东理工大学—沂源县产业技术研究院科技项目支持计划(编号:3221005)

作者简介:赵亚,女,山东理工大学高级实验师,硕士。

通信作者:石启龙(1974—),男,山东理工大学教授,博士。

E-mail: qilongshi@sdu.edu.cn

收稿日期:2022-12-19 **改回日期:**2023-03-12

accordingly. **Results:** The optimum parameter combinations of *L. crisps* during DIC processing were moisture content after heat pump pre-drying of 35.63%, puffing temperature of 100 °C, vacuum drying temperature of 64.17 °C. Under the control of these optimal parameter combinations, the puffing degree of *L. crisps* was 69.34%, total color difference was 20.68, hardness was 108.16 N, and crispness was 75.79. **Conclusion:** Uniform design combined with response surface methodology can be used to optimize processing parameters of DIC crisps and obtain high quality non-fried *L. crisps*.

Keywords: *Lentinus edodes* crisps; instant controlled pressure drop puffing; uniform design; puffing degree; quality attributes

香菇(*Lentinus edodes*)为担子菌纲伞菌目口蘑科,是珍贵食用菌,富含营养物质和生物活性物质^[1]。新鲜香菇含水率高,呼吸旺盛,采收贮运过程中容易腐烂变质,营养价值和商品价值降低^[2]。食用菌休闲食品如脆片因高蛋白、低脂肪、食用方便等优点备受消费者青睐^[3]。目前,即食食用菌脆片主要通过油炸/真空油炸技术制备,但产品含油率高,长期食用对人体健康不利^[4-5]。真空冷冻干燥(vacuum freeze drying, VFD)可获得高品质香菇脆片,但设备投资和运营成本高^[6-7]。真空微波干燥速率快、节能高效、营养素损失少,但是加热不均匀,产品容易焦糊,且存在微波泄露等问题^[8-9]。此外,红外干燥也可以获得高品质香菇脆片,但其以脱水为主,干制品膨化程度低^[10]。

瞬时压差膨化(instant controlled pressure drop puffing, DIC),又称气流膨化、变温压差膨化、爆炸膨化干燥、压差闪蒸膨化干燥。压差闪蒸联合干燥是指将热风干燥、热泵干燥、VFD串联 DIC,制备疏松、多孔膨化制品

的技术^[11]。目前,压差闪蒸联合干燥主要用于果蔬脆片的加工,如苹果^[12-13]、黄桃^[14]、枸杞^[15]、胡萝卜^[16-17]、白萝卜^[18]、南瓜^[19]、山药^[20]等。刘增强等^[21-22]以切片后的香菇为原料,采用响应面法优化了 VFD-DIC、中短波红外-DIC 香菇脆片工艺参数。但有关整果香菇 DIC 膨化方面的研究尚未见报道。VFD 能耗高^[6,9],红外辐射加热不均匀且穿透深度有限^[23]。热泵干燥(heat pump drying,HPD)因参数易于调控、条件温和、能效高且环境友好等优点,尤其适用于热敏性物料如果蔬、水产品、食用菌等的干燥^[24]。研究^[25-29]表明,DIC 工艺参数之间存在显著交互作用,对膨化制品品质影响显著。毕金峰等^[11]指出,基于温度、压力、含水率、品质等关键条件的轨迹变化与数学模型构建和求解的动态优化策略,是压差闪蒸联合干燥工艺数字化和智能化发展的方向。研究拟以预干燥含水率、膨化温度、停滞时间、膨化压力和真空温度为因素,以膨化度(P_d)、复水比(R_R)、总色差(ΔE)、硬度和脆度为响应值,利用单因素试验和均匀试验设计,探究各因素对响应值的影响规律,通过加权综合评分法构建多项式回归模型,优化求解并验证香菇脆 DIC 最优工艺参数,以期为高品质、非油炸香菇脆 HPD-DIC 技术的发展提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜香菇:采摘后立即冷链运输至实验室,5℃冷藏备用,初始湿基含水率为(85±2)%,菌盖直径(5.0±0.5)cm,淄博众志农业科技有限公司;

麦芽糊精(MD):食品级,DE 值为 15,山东西王集团有限公司;

乳清分离蛋白(WPI):食品级,山东谷康生物工程有限公司;

无水亚硫酸钠:分析纯,天津市瑞金特化学品有限公司;

食盐、鸡味粉:市售。

1.1.2 主要仪器设备

热泵除湿干燥设备:1HP-5 型,青岛欧美亚科技有限公司;

果蔬低温气流膨化设备:PHK600-1 型,天津市勤德新材料科技有限公司;

核磁共振分析仪:PQ001 型,上海纽迈电子科技有限公司;

物性测试仪:TA.XT PLU 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

测色色差计:WSC-S 型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

分析天平:AL204 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 渗透调味预处理 香菇去除菇柄、清洗后置于质量分数 0.6%亚硫酸钠溶液中护色 20 min,沥干表面水分。于热泵干燥温度 35℃、风速 1.5 m/s,相对湿度 40%~60%条件下,预干燥至湿基含水率 70%。将香菇置于复合渗透调味溶液(20% MD,10% WPI,2% 食盐,1% 鸡味粉)中,于温度 25℃、料液比 1:3(g/mL)下渗透调味处理 3 h。

1.2.2 单因素试验 渗透调味预处理后的香菇平均分成 5 份,于热泵干燥温度 35℃、风速 1.5 m/s,相对湿度 40%~60%条件下,预干燥至湿基含水率分别为 25%,30%,35%,40%,45%,密封于铝箔袋中,4℃均湿处理 24 h。将均湿处理后的香菇分别置于果蔬低温气流膨化设备中,控制膨化温度(75,80,85,90,95℃)、膨化压力(0.1,0.2,0.3 MPa)、停滞时间(9,12,15,18,21 min)和真空干燥温度(60,65,70,75,80℃),直至样品的湿基含水率≤7%,铝箔袋密封备用。

1.2.3 均匀试验设计 选择热泵预干燥后湿基含水率(X_1)、膨化温度(X_2)、真空干燥温度(X_3)作为自变量,以香菇脆 P_d 、 R_R 、 ΔE 、硬度和脆度为响应值,采用 U_{12}^6 表进行试验。

1.2.4 膨化度 采用比容法测定香菇体积^[30],按式(1)计算 P_d 。

$$P_d = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

V_0 ——DIC 前香菇体积,mL;

V ——DIC 后香菇体积,mL。

1.2.5 复水比 参考屈展平等^[31]的方法,按式(2)计算 R_R 。

$$R_R = \frac{m_r}{m_0}, \quad (2)$$

式中:

m_0 ——香菇脆复水前质量,g;

m_r ——香菇脆复水后的质量,g。

1.2.6 色差 采用色差计测定。按式(3)计算 ΔE ^[32]。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

L^* 、 a^* 、 b^* ——新鲜香菇色泽参数;

L 、 a 、 b ——DIC 香菇脆色泽参数。

1.2.7 硬度和脆度 参考王纯等^[33]的方法略作改动。选取 P/75 柱形探头,设置形变量为 50%,测试前、中、后速度分别为 2.0,1.0,1.0 mm/s,触发力 0.98 N,2 次压缩间隔时间 5.0 s,数据采集速率 500 次/s。测试峰最高值

为硬度,峰个数为脆度值。每组样品平行测定 12 次取平均值。

1.2.8 加权综合评分法 参考段续等^[10]的方法。试验主要探究香菇脆膨化工艺,因此 P_d 最为重要,而 ΔE 、硬度和脆度 3 个指标重要性均等。将 P_d 、 ΔE 、硬度和脆度权重设定为 4 : 2 : 2 : 2,并按式(4)、式(5)计算综合评分。

$$y_{ij} = \frac{y_{ij} - y_{j\min}}{y_{j\max} - y_{j\min}} \times 100, \quad (4)$$

$$y'_i = \sum w_j y'_{ij}, \quad (5)$$

式中:

y_{ij} ——实际指标值;

w_j ——指标加权系数;

y'_{ij} ——单个指标评分值;

y'_i ——综合评分值。

1.3 数据处理

所有试验至少平行 3 次,结果表示为平均值±标准差。采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析和回归分析,差异显著则进行 Duncan 多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用 Matlab R2018a 制图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 热泵预干燥后湿基含水率对香菇脆品质的影响

控制膨化压力 0.3 MPa、膨化温度 85 °C、停滞时间 15 min、真空干燥温度 70 °C,探究热泵预干燥后香菇湿基含水率对 DIC 香菇脆品质的影响。由表 1 可知,预干

燥后香菇湿基含水率显著影响香菇脆品质($P < 0.05$),随着湿基含水率的增加, P_d 呈先增加而后降低趋势,湿基含水率为 35%时 P_d 最高。含水率过低,产生蒸汽量不足,膨化动力低;但含水率过高,物料水分汽化不完全,影响膨化效果^[26]。香菇脆 R_R 与 P_d 有关^[22],随湿基含水率的增加呈先升高而后降低趋势,湿基含水率为 35%,40%时, R_R 显著高于其他组。预干燥后样品湿基含水率为 40%时,香菇脆 ΔE 显著低于湿基含水率 25%,30%,35%的样品($P < 0.05$),但 40%与 45%的样品之间、35%与 45%之间无显著差异($P > 0.05$)。香菇脆硬度随湿基含水率的增加呈先减小而后增大趋势,湿基含水率为 35%时,硬度达到最小值。脆度则随湿基含水率的增加呈先增加而后降低趋势,湿基含水率为 35%,40%时,脆度显著高于其他组($P < 0.05$)。郭玲玲等^[22]研究表明,随着预干燥含水率增加,香菇脆片亮度降低、硬度增加,说明香菇形态(切片与否)、预干燥方式(中短波红外、热泵干燥)、压差膨化参数范围对香菇脆品质影响显著。综合考虑,热泵预干燥后湿基含水率为 35%~40%时香菇脆品质较好。

2.1.2 膨化温度对香菇脆品质的影响 控制热泵预干燥后香菇湿基含水率 35%,膨化压力 0.3 MPa,停滞时间 15 min,真空干燥温度 70 °C,探究膨化温度对 DIC 香菇脆品质的影响。由表 2 可知,当膨化温度由 75,80 °C 升高至 85 °C 时,香菇脆 P_d 显著增加($P < 0.05$),膨化温度继续升高至 90,95 °C 时, P_d 变化不显著($P > 0.05$)。这是由于膨化温度低时,香菇内部水分扩散慢,膨化效果差,影响香菇脆内部多孔结构^[21]。 R_R 随膨化温度的升高呈

表 1 热泵预干燥后湿基含水率对香菇脆品质的影响[†]

Table 1 Effects of moisture content in wet basis after heat pump pre-drying on the quality of shiitake crisps

湿基含水率/%	P_d /%	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
25	19.70±0.98 ^e	2.11±0.09 ^b	31.37±1.47 ^a	169.88±9.25 ^a	59.83±3.19 ^c
30	27.17±2.88 ^d	2.13±0.10 ^b	32.06±2.61 ^a	154.39±4.92 ^b	63.50±4.85 ^b
35	55.74±1.36 ^a	2.35±0.07 ^a	16.05±2.88 ^b	102.13±5.07 ^c	73.17±3.16 ^a
40	50.72±2.36 ^b	2.30±0.08 ^a	12.88±1.38 ^c	132.88±4.99 ^d	72.92±5.33 ^a
45	31.24±1.90 ^c	2.10±0.10 ^b	14.15±1.99 ^{bc}	148.99±7.44 ^c	64.08±3.26 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

表 2 膨化温度对香菇脆品质的影响[†]

Table 2 Effects of puffing temperature on the quality of shiitake mushroom crisps

膨化温度/°C	P_d /%	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
75	43.07±2.79 ^b	2.31±0.08 ^b	26.22±2.17 ^a	121.73±3.82 ^a	63.67±3.23 ^a
80	42.71±0.71 ^b	2.30±0.05 ^b	16.09±0.33 ^c	121.52±9.23 ^a	64.33±4.12 ^a
85	47.70±2.00 ^a	2.57±0.08 ^a	17.44±0.72 ^b	122.08±4.40 ^a	62.25±5.45 ^{ab}
90	47.48±0.91 ^a	2.25±0.05 ^{bc}	16.37±1.11 ^{bc}	115.50±4.36 ^b	51.33±5.33 ^c
95	48.35±1.67 ^a	2.21±0.06 ^c	10.02±1.07 ^d	112.99±6.93 ^b	59.42±3.94 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

先增加后降低趋势,膨化温度为 85 °C 时达到最高值。这可能是由于膨化温度过高,香菇粗多糖降解、蛋白质变性、组织内部结构被破坏,香菇脆持水能力受损所致^[10]。 ΔE 随膨化温度的升高呈先降低后增加再降低趋势,膨化温度为 95 °C 时 ΔE 最低。这主要是由于提升膨化温度,有利于香菇中水分汽化,形成膨化动力,压差闪蒸及真空干燥过程中,水分损失量增加,膨化干燥速率加快,进而降低 ΔE 。香菇脆硬度和脆度则随膨化温度的升高逐渐降低,膨化温度为 90 °C 时,硬度和脆度最低。刘增强等^[21]研究表明,香菇脆片硬度随膨化温度的升高变化不明显,但脆度逐渐降低,说明香菇切片与否、预干燥方式不同对 DIC 香菇脆质构特性的影响有差异。综合考虑,香菇脆最适宜的膨化温度为 85~95 °C。

2.1.3 膨化压力对香菇脆品质的影响 控制热泵预干燥后香菇湿基含水率 35%,膨化温度 85 °C,停滞时间 15 min,真空干燥温度 70 °C,探究膨化压力对 DIC 香菇脆品质的影响。由表 3 可知,随着膨化压力的升高,香菇脆 P_d 显著提高 ($P < 0.05$),因为膨化压力提高,膨化罐与真空罐之间的压力差增加,膨化动力增加,促进香菇形成多孔的网状结构。香菇脆 R_R 受香菇内部孔隙结构影响,与 P_d 正相关^[22],相比于 0.1、0.2 MPa,膨化压力为 0.3 MPa 时, R_R 显著增加 ($P < 0.05$)。膨化压力为 0.2 MPa 时, ΔE 显著低于其他组 ($P < 0.05$),具体原因有待进一步探究。硬度随膨化压力的升高而降低,脆度则呈先降低后增加趋势。刘增强等^[21]研究表明,香菇片的硬度随膨化压力的增加无明显变化,而脆度在膨化压力为 0.2 MPa 时最大。这主要是由于香菇形态(整果、切

片)、预干燥方式(VFD、HPD)不同所致。综合考虑,香菇脆最适膨化压力为 0.3 MPa。

2.1.4 停滞时间对香菇脆品质的影响 控制热泵预干燥后香菇湿基含水率 35%,膨化温度 85 °C,膨化压力 0.3 MPa,真空干燥温度 70 °C,探究停滞时间对 DIC 香菇脆品质的影响。由表 4 可知,停滞时间 ≥ 15 min 时, P_d 显著降低 ($P < 0.05$)。停滞时间由 12 min 延长至 18 min 时, R_R 显著降低 ($P < 0.05$)。但是停滞 9 min 与 18 min 的样品之间、18 min 与 21 min 的样品之间, R_R 无明显差异。停滞时间对 ΔE 影响无明显规律,当停滞时间为 12 min 时, ΔE 达到最小值。硬度随停滞时间的增加呈升高后降低趋势,而停滞时间对脆度影响无明显规律。停滞时间可起到使物料内外温度达到平衡的作用,停滞时间过短,香菇组织内外温度不平衡,不利于物料水分散失和膨化;停滞时间过长,会引起物料表面过热焦糊,影响其感官和营养^[21]。综合考虑,香菇脆最适停滞时间为 12 min。

2.1.5 真空干燥温度对香菇脆品质的影响 控制热泵预干燥后香菇湿基含水率 35%,膨化温度 85 °C,膨化压力 0.3 MPa,停滞时间 15 min,探究真空干燥温度对 DIC 香菇脆品质的影响。由表 5 可知,当真空干燥温度为 60、65 °C 时, P_d 最高,而后随着真空干燥温度的升高而降低。随着真空干燥温度的升高, R_R 呈先增加后降低趋势,真空干燥温度为 65 °C 时达到最高值。真空干燥温度过高,香菇内部组织结构被严重破坏,复水能力降低^[10]。随着真空干燥温度的升高, ΔE 呈先降低后增加趋势,真空干燥温度为 65 °C 时达到最小值。真空干燥温度对色泽的影

表 3 膨化压力对香菇脆品质的影响[†]

Table 3 Effects of puffing pressure on the quality of shiitake mushroom crisps

膨化压力/MPa	$P_d/\%$	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
0.1	20.76±2.24 ^c	2.26±0.10 ^b	17.55±1.63 ^a	146.22±7.70 ^a	66.67±4.33 ^a
0.2	34.96±2.53 ^b	2.34±0.08 ^b	12.85±1.49 ^b	123.87±7.39 ^b	55.58±4.25 ^c
0.3	47.70±2.00 ^a	2.57±0.08 ^a	17.44±0.72 ^a	122.08±4.40 ^b	62.25±5.45 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 停滞时间对香菇脆品质的影响[†]

Table 4 Effects of stagnation time on the quality of shiitake mushroom crisps

停滞时间/min	$P_d/\%$	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
9	46.61±2.26 ^a	2.46±0.11 ^{ab}	25.79±1.38 ^b	116.06±6.18 ^c	64.50±4.68 ^b
12	47.70±2.00 ^a	2.57±0.08 ^a	17.44±0.72 ^d	122.08±4.40 ^b	62.25±5.45 ^{bc}
15	43.27±1.66 ^b	2.37±0.12 ^{bc}	30.07±0.93 ^a	122.51±7.05 ^{ab}	65.50±3.00 ^b
18	41.03±1.68 ^{bc}	2.24±0.11 ^d	18.35±0.68 ^d	127.82±8.65 ^a	60.50±3.03 ^c
21	39.68±0.82 ^c	2.30±0.09 ^{cd}	24.06±1.25 ^c	120.80±6.23 ^{bc}	69.92±4.48 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 5 真空干燥温度对香菇脆品质的影响[†]

Table 5 Effects of vacuum drying temperature on the quality of shiitake mushroom crisps

干燥温度/℃	$P_d/\%$	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
60	46.29±1.78 ^{ab}	2.35±0.09 ^b	23.20±1.15 ^b	168.01±8.00 ^a	81.83±4.95 ^a
65	47.70±2.00 ^a	2.57±0.08 ^a	17.44±0.72 ^d	122.08±4.40 ^c	62.25±5.45 ^c
70	43.58±1.13 ^c	2.22±0.09 ^c	19.34±1.24 ^c	118.97±5.88 ^c	58.92±4.80 ^c
75	43.97±0.48 ^{bc}	2.19±0.07 ^c	23.33±1.54 ^b	103.40±3.54 ^d	59.42±3.82 ^c
80	39.47±0.46 ^d	2.09±0.03 ^d	25.57±0.86 ^a	149.40±9.80 ^b	66.17±4.76 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

响主要是由于:① 高温破坏了香菇表面氨基酸和总糖;② 高温加剧了美拉德褐变反应^[22]。硬度与脆度随真空干燥温度的升高呈先降低后增加趋势,其中,75℃时硬度最小,60℃时脆度最高。这与刘增强等^[21]的结论一致。综合考虑,香菇脆最适真空干燥温度为60~70℃。

2.2 均匀设计试验结果

选择热泵预干燥后香菇湿基含水率、膨化温度和真空干燥温度为因素,采用均匀试验设计探究各因素对香菇脆品质的影响,试验设计方案见表6,试验结果见表7。

表 6 均匀试验设计方案

Table 6 Experimental arrangement of uniform design

试验号	X_1 热泵预干燥后湿基含水率/%	X_2 膨化温度/℃	X_3 真空干燥温度/℃
1	25	75	60
2	30	80	65
3	35	85	70
4	40	90	75
5	45	95	80
6	50	100	85

采用 SPSS 软件,以 X_1 、 X_2 、 X_3 为自变量进行非线性回归分析,得到香菇脆 $P_d(Y_1)$ 、 $R_R(Y_2)$ 、 $\Delta E(Y_3)$ 、硬度(Y_4)和脆度(Y_5)与自变量之间的回归方程:

$$Y_1 = 1.033 + 18.457X_1 - 7.708X_2 + 0.977X_3 - 0.212X_1^2 + 0.074X_2^2 - 0.032X_3^2 - 0.110X_1 X_2 + 0.100X_1 X_3 - 0.009X_2 X_3, R^2 = 0.945, \quad (6)$$

$$Y_2 = 0.971 + 0.097X_1 - 0.055X_2 + 0.052X_3 + 0.001X_2^2 - 0.001X_1 X_2, R^2 = 0.294, \quad (7)$$

$$Y_3 = 0.949 - 3.979X_1 + 0.326X_2 + 2.043X_3 + 0.053X_1^2 + 0.002X_2^2 + 0.006X_3^2 + 0.019X_1 X_2 - 0.022X_1 X_3 - 0.021X_2 X_3, R^2 = 0.827, \quad (8)$$

$$Y_4 = 0.904 - 8.805X_1 - 1.076X_2 + 7.796X_3 + 0.256X_1^2 + 0.026X_2^2 + 0.008X_3^2 - 0.024X_1 X_2 - 0.102X_1 X_3 - 0.043X_2 X_3, R^2 = 0.900, \quad (9)$$

$$Y_5 = 1.037 + 12.844X_1 - 2.659X_2 - 1.322X_3 - 0.121X_1^2 + 0.024X_2^2 - 0.021X_3^2 - 0.084X_1 X_2 + 0.051X_1 X_3 + 0.023X_2 X_3, R^2 = 0.741. \quad (10)$$

根据回归方程, P_d 、 ΔE 、硬度和脆度的 R^2 分别为 0.945, 0.827, 0.900, 0.741, 说明这 4 个响应值的回归模型拟合度较高,可以较好地反映各响应值的变化规律。由

表 7 均匀试验设计结果

Table 7 Experimental results of the uniform design

试验号	X_1	X_2	X_3	$P_d/\%$	R_R	ΔE	硬度/N	脆度
1	1	2	2	15.58	2.32	24.44	117.81	57.17
2	1	3	4	6.04	2.49	30.90	156.12	41.83
3	2	5	6	20.97	2.42	23.00	142.70	58.50
4	2	6	2	66.71	2.61	21.77	117.57	76.58
5	3	1	4	35.25	2.38	23.64	137.48	60.33
6	3	3	6	29.48	2.44	26.44	137.83	64.58
7	4	4	1	45.48	2.42	18.63	108.52	64.75
8	4	6	3	71.07	2.67	20.31	108.14	80.83
9	5	1	5	56.22	2.58	23.08	153.08	74.83
10	5	2	1	39.25	2.46	22.84	136.77	71.00
11	6	4	3	9.01	2.31	28.28	161.37	54.33
12	6	5	5	13.86	2.37	29.69	169.27	44.50

F 检验可知,回归方程拟合检验均显著,表明回归模型在试验中有意义,能够反映实际情况;而失拟检验均不显著,说明无不可忽视的因素存在,回归方程足以反映试验中响应值的变化规律。

根据各响应值的回归方程可知,影响香菇脆 P_d 的主次顺序为 $X_1 > X_2 > X_3$,影响 ΔE 的主次顺序为 $X_3 > X_1 > X_2$,影响硬度的主次顺序为 $X_1 > X_3 > X_2$,影响脆度的主次顺序为 $X_1 > X_2 > X_3$ 。此外, R_R 回归方程的 R^2 值较小,说明各因素对 R_R 在 95% 置信范围内影响不显著。

2.3 响应面分析

2.3.1 交互作用对香菇脆 P_d 的影响 由图 1(a)可知,真空干燥温度一定时, P_d 随湿基含水率的升高呈先增加后降低趋势,含水率为 35% 左右时, P_d 较高。随着膨化温度的升高, P_d 维持短暂稳定后迅速增加。由图 1(b)可知,膨化温度一定时, P_d 随湿基含水率的增加呈先升高后逐渐降低趋势,随真空干燥温度的升高先维持短暂恒定后急剧降低。由图 1(c)可知,湿基含水率一定时,随着膨化温度的升高, P_d 维持短暂稳定后迅速增加,但是,随着真空干燥温度的升高, P_d 先维持短暂恒定后迅速下降。这主要是由于真空干燥温度过低,物料膨化所需能量不足,但温度过高,容易导致香菇表面硬化,影响水分扩散;此外,适当的膨化温度有助于香菇形成蓬松网状结构,适宜的真空干燥温度和时间,则有助于稳定和保持蓬松骨架形成的弹性小室,最终定型成疏松多孔的结构^[34]。

2.3.2 交互作用对香菇脆 ΔE 的影响 由图 2 可知,真空干燥温度一定时, ΔE 随湿基含水率的增加呈先降低后

增加趋势。膨化温度恒定时, ΔE 随湿基含水率的增加呈先降低后增加趋势。香菇湿基含水率一定时, ΔE 随膨化温度的升高缓慢增加,但随真空干燥温度的升高急剧增加。膨化温度和真空干燥温度越高,香菇色泽越差,主要归因于香菇在高温下会发生美拉德褐变^[34]。总体而言,湿基含水率接近 35% 时 ΔE 较低,适当提高膨化温度,降低真空干燥温度有利于香菇脆色泽的保持。

2.3.3 交互作用对香菇脆硬度的影响 由图 3(a)可知,真空干燥温度保持恒定时,随着湿基含水率的增加,香菇脆硬度呈先降低后增加趋势;随着膨化温度的升高,硬度先缓慢降低后略微增加,总体变化趋势较为平缓。由图 3(b)可知,保持膨化温度不变,硬度随湿基含水率的增加呈先降低后增加趋势,随真空干燥温度的升高呈近似线性增加趋势。由图 3(c)可知,香菇预干燥后湿基含水率维持不变时,硬度随膨化温度的升高先缓慢降低后略有增加,随真空干燥温度的升高呈近似线性增加趋势。因此,香菇预干燥后湿基含水率维持 35% 左右,提高膨化温度,降低真空干燥温度有利于获得较好的硬度。

2.3.4 交互作用对香菇脆脆度的影响 由图 4(a)可知,保持真空干燥温度恒定,随着预干燥后香菇湿基含水率的升高,脆度先增加后降低;随着膨化温度的升高,脆度呈增加趋势。由图 4(b)可知,膨化温度恒定时,脆度随真空干燥温度的升高而降低;但随湿基含水率的增加呈先增加后降低趋势,湿基含水率接近 35% 时,脆度较高。由图 4(c)可知,保持预干燥后香菇湿基含水率不变,脆度随膨化温度的升高先缓慢降低后逐渐升高,随真空干燥温度的升高

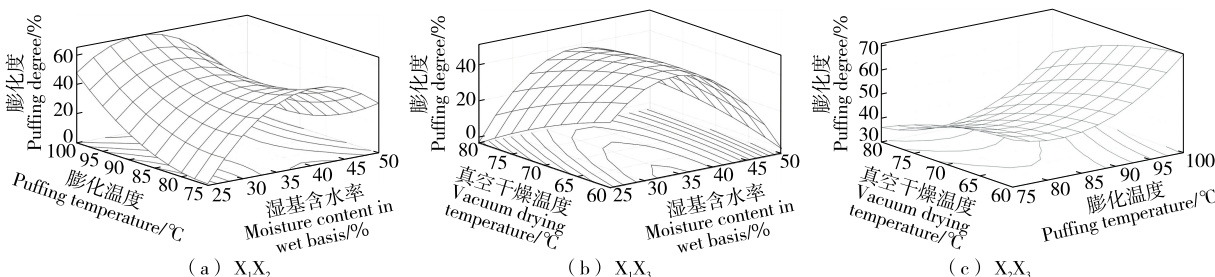


图 1 交互作用对香菇脆膨化度的影响

Figure 1 Effects of interaction on the puffing degree of shiitake crisps

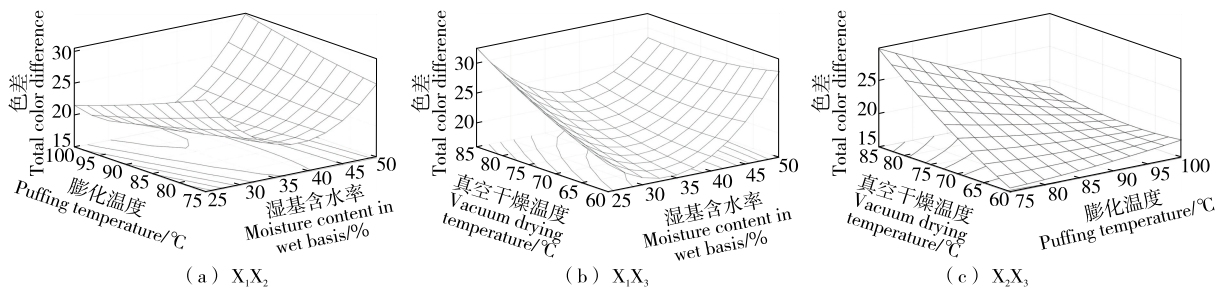


图 2 交互作用对香菇脆色差的影响

Figure 2 Effects of interaction on the color difference of shiitake crisps

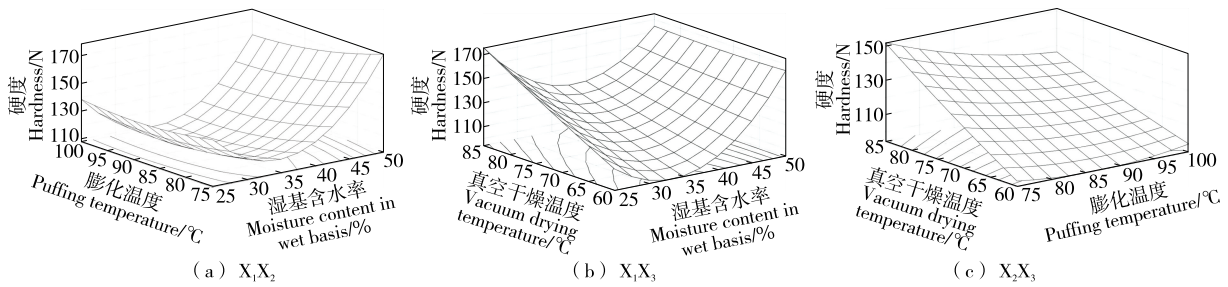


图 3 交互作用对膨化香菇硬度的影响

Figure 3 Effects of interaction on the on the hardness of puffed shiitake crisps

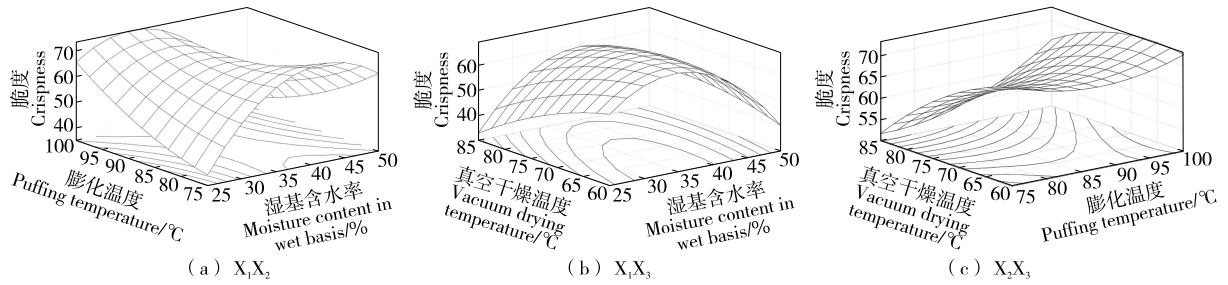


图 4 交互作用对香菇脆脆度的影响

Figure 4 Effects of interaction on the brittleness of shiitake crisps

逐渐降低。因此,香菇预干燥后湿基含水率维持 35% 左右,提高膨化温度,降低真空干燥温度有利于提高脆度。

2.4 工艺参数优化与验证

对于香菇脆品质评价指标而言, P_d 越高, ΔE 越小, 硬度越低,脆度越高,则产品品质越佳。由于 R_R 的回归方程 R^2 较低,此外,研究旨在开发即食休闲膨化食品,复水特性仅作为需要复水后食用的工序参考,故相比于其他指标, R_R 的重要度较低,故参数优化暂不考虑。对于香菇脆, P_d 是最重要的指标,硬度和脆度均与 P_d 有关, ΔE 可以通过干燥前护色工艺进一步调控。基于此,赋予 P_d 、 ΔE 、硬度和脆度的权重比值为 4 : 2 : 2 : 2,构建模型

后表达式为:

$$Y = -0.1984 - 0.8616X_1 + 0.1797X_2 + 0.1885X_3 + 0.0114X_1^2 - 0.0013X_2^2 + 0.0014X_3^2 + 0.0037X_1X_2 - 0.0050X_1X_3 - 0.0019X_2X_3 \quad (11)$$

采用 Matlab R2018a 软件优化求解,得到最佳工艺参数为预干燥湿基含水率 35.63%,膨化温度 100 °C,真空干燥温度 64.17 °C。根据优化后的参数条件进行验证实验,得到香菇脆的 P_d 为 69.34%, ΔE 为 20.68,硬度为 108.16 N,脆度为 75.79,4 个指标的测试值与理论预测值差异不显著 ($P > 0.05$) (表 8)。因此,该回归方程可以较好地模拟和预测 DIC 香菇脆品质变化。

表 8 模型预测值与测试值的比较

Table 8 Comparison between the model prediction value and test value

响应值	P_d /%	ΔE	硬度/N	脆度
预测值	72.35	20.02	105.83	78.18
测试值	69.34±5.81	20.68±1.59	108.16±7.61	75.79±5.90
显著性(t 检验)	0.999	0.054	0.148	0.059

3 结论

探究了影响香菇脆品质的因素,在此基础上采用均匀试验设计结合响应面分析各因素交互作用对香菇脆品质的影响规律。通过加权综合评分法构建多项式回归模型并优化求解、验证,得到香菇脆瞬时压差膨化最优工艺参数为预干燥含水率 35.63%,膨化温度 100 °C,真空干燥温度 64.17 °C。此条件下香菇脆膨化度为 69.34%,色差

为 20.68,硬度为 108.16 N,脆度为 75.79。风味是影响香菇脆品质和消费者接受程度的重要指标,后续研究应侧重于压差膨化干燥过程中香菇脆风味变化规律与机制。

参考文献

[1] 陈静,唐浩国,王嘉康,等. 香菇酱研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 225-229.
CHEN J, TANG H G, WANG J K, et al. Research progress of

- mushroom sauce[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(11): 225-229.
- [2] 张越翔, 刘静, 吴小恬, 等. 食用菌干燥技术研究进展[J]. *中国果菜*, 2022, 42(1): 24-33.
ZHANG Y X, LIU J, WU X T, et al. Research process on drying technology of edible fungus[J]. *Chinese Fruits & Vegetables*, 2022, 42(1): 24-33.
- [3] 武旭瑶, 马有川, 黄文英, 等. 热风干燥过程中果蔬片脆性变化规律[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 22-28.
WU X Y, MA Y C, HUANG W Y, et al. Variation of food brittleness of the fruit and vegetable slices during hot air drying process[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 22-28.
- [4] 任爱清, 邓珊, 唐小闲, 等. 香菇脆片真空油炸—真空微波联合干燥工艺优化[J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 165-170.
REN A Q, DENG S, TANG X X, et al. Process optimization of vacuum-frying combined vacuum-microwave drying in producing shiitake mushroom chips[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(10): 165-170.
- [5] 曹晶晶, 罗晓莉, 何容, 等. 真空油炸食用菌脆片低含油率加工技术[J]. *中国食用菌*, 2022, 41(1): 67-69, 75.
CAO J J, LUO X L, HE R, et al. Processing technology of vacuum fried edible fungi chips with low oil content[J]. *Edible Fungi of China*, 2022, 41(1): 67-69, 75.
- [6] 高兴洋, 安辛欣, 赵立艳, 等. 真空低温油炸和真空冷冻干燥对香菇脆片品质及挥发性风味成分的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(17): 88-93.
GAO X X, AN X X, ZHAO L Y, et al. Effects of vacuum frying versus freeze drying on quality and volatile components of shiitake (*Lentinula edodes*) chips[J]. *Food Science*, 2015, 36(17): 88-93.
- [7] 金玮玲, 高虹, 范秀芝, 等. 不同预处理方法对真空冷冻干燥香菇脆片感官品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 108-112.
JIN W L, GAO H, FAN X Z, et al. Effect of different pretreatment methods on the sensory quality of *Lentinus edodes* chips produced by vacuum freeze-drying[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 108-112.
- [8] 刘秀凤, 蔡金星, 徐瑞萍. 微波膨化香菇工艺优化[J]. *河北科技师范学院学报*, 2012, 26(1): 61-64.
LIU X F, CAI J X, XU R P. Optimization of microwave-puffing *Lentinula edodes*[J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2012, 26(1): 61-64.
- [9] 刘增强, 丁文平, 庄坤, 等. 香菇脆片加工技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 345-349.
LIU Z Q, DING W P, ZHUANG K, et al. Research progress in processing technology of *Lentinus edodes* chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(6): 345-349.
- [10] 段续, 徐一铭, 任广跃, 等. 香菇分段变温红外喷动床干燥工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 293-302.
DUAN X, XU Y M, REN G Y, et al. Optimization of the drying process parameters for *Lentinus edodes* in segment variable temperature infrared assisted spouted bed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 293-302.
- [11] 毕金峰, 胡丽娜, 吕健, 等. 压差闪蒸联合干燥技术与动态优化策略研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(1): 1-10.
BI J F, HU L N, LU J, et al. Research advance of instant controlled pressure drop combined drying technology and dynamic optimization strategy[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(1): 1-10.
- [12] ZHOU L Y, WANG X Y, BI J F, et al. Effect of different moisture equilibration process on the quality of apple chips dried by instant controlled pressure drop (dic)-assisted hot air drying[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(1): e13316.
- [13] LI X, BI J F, CHEN Q Q, et al. Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 101: 351-359.
- [14] GUO J, LIU C J, LI Y, et al. Effect of sucrose and citric acid on the quality of explosion puffing dried yellow peach slices[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(13): 2 783-2 793.
- [15] SONG H H, BI J F, CHEN Q Q, et al. Structural and health functionality of dried goji berries as affected by coupled dewaxing pre-treatment and hybrid drying methods[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2 527-2 538.
- [16] PENG J, YI J Y, BI J F, et al. Freezing as pretreatment in instant controlled pressure drop (DIC) texturing of dried carrot chips: Impact of freezing temperature [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 89: 365-373.
- [17] XU Y Y, LANG X M, XIAO Y D, et al. Study on drying efficiency, uniformity, and physicochemical characteristics of carrot by tunnel microwave drying combined with explosion puffing drying[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(2): 416-429.
- [18] XUE Y L, CHEN J N, HAN H T, et al. Multivariate analysis of the physicochemical properties of turnip (*Brassica rapa L.*) chips dried using different methods[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(4): 411-419.
- [19] KÖPRÜALAN Ö, ALTAY Ö, BODRUK A, et al. Effect of hybrid drying method on physical, textural and antioxidant properties of pumpkin chips [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15: 2 995-3 004.
- [20] GAO Q, CHEN J N, ZHANG J C, et al. Comparison of explosion puffing drying with other methods on the physicochemical properties and volatiles of yam (*Dioscorea opposita thunb.*) chips through multivariate analysis[J]. *Drying Technology*, 2022, 40(7): 1 405-1 420.
- [21] 刘增强, 邓林爽, 丁文平, 等. 变温压差膨化干燥香菇脆片的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(20): 186-193, 199.
LIU Z Q, DENG L S, DING W P, et al. Optimization of varying temperature and pressure puffing for *Lentinus edodes* chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(20): 186-193, 199.
- [22] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰, 等. 香菇中短波红外—脉动压差闪蒸联合干燥工艺研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(2): 155-165.

- GUO L L, ZHOU L Y, BI J F, et al. Studies on dry technics of shiitake mushroom using pulsed sudden decompression flashing drying and medium-shortwave infrared radiation [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(2): 155-165.
- [23] 朱凯阳,任广跃,段续,等. 红外辐射技术在农产品干燥中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 303-311.
- ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Application of infrared radiation technology in drying of agricultural products[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(20): 303-311.
- [24] 赵亚,朱智壮,石启龙,等. 成膜预处理提高扇贝柱超声波辅助热泵干燥效率及品质[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 274-283.
- ZHAO Y, ZHU Z Z, SHI Q L, et al. Coating pretreatment improved drying efficiency and quality attributes of ultrasonic assisted heat pump dried scallop adductors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 274-283.
- [25] 高鹤,易建勇,毕金峰,等. 番木瓜真空冷冻联合变温压差膨化干燥工艺优化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 156-163.
- GAO H, YI J Y, BI J F, et al. Optimization of the vacuum freeze combined explosion puffing drying for papaya[J]. Journal of the Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(7): 156-163.
- [26] 宋一凡,陈海峰,袁越锦. 猕猴桃 CO₂-低温高压渗透膨化干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 229-234.
- SONG Y F, CHEN H F, YUAN Y J. Optimization of CO₂-low temperature high pressure permeation drying process of kiwifruit [J]. Food Science, 2020, 41(4): 229-234.
- [27] YI J Y, HOU C H, BI J F, et al. Novel combined freeze-drying and instant controlled pressure drop drying for restructured carrot-potato chips: Optimized by response surface method[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2 018: 6157697.
- [28] SONG J F, GONZALLES G, LIU J, et al. Optimization of explosion puffing drying for high-value yellow-fleshed peach crisps using response surface methodology[J]. Drying Technology, 2019, 37(8): 929-940.
- [29] YUAN Y J, ZHAO Z, WANG L, et al. Process optimization of CO₂ high-pressure and low-temperature explosion puffing drying for apple chips using response surface methodology [J]. Drying Technology, 2022, 40(1): 100-115.
- [30] SUI X L, ZHAO Y, ZHANG X, et al. Hydrocolloid coating pretreatment makes explosion puffing drying applicable in protein-rich foods: A case study of scallop adductors [J]. Drying Technology, 2022, 40(1): 50-64.
- [31] 屈展平,张小燕,宋淑亚,等. 变异系数法评价预处理方式对黄秋葵热风干燥品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 150-155.
- QU Z P, ZHANG X Y, SONG S Y, et al. Evaluation of the influence of pretreatment methods on the quality characteristics of okra hot-air drying based on the coefficient of variation method[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 150-155.
- [32] 孟迪,党斌,张杰,等. 干燥方法对黄蘑菇品质及微观结构的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 139-145.
- MENG D, DANG B, ZHANG J, et al. Effects of drying methods on the quality and microstructure of *Armillaria luteo-virens* [J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 139-145.
- [33] 王纯,戴艳军,孙玥,等. 不同品种菌菇加工脆片适宜性评价[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 171-175, 238.
- WANG C, DAI Y J, SUN Y, et al. Suitability evaluation for processing chips from different mushroom varieties[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 171-175, 238.
- [34] 刘丽娜,王安建,田广瑞,等. 响应面法优化香菇柄变温压差膨化干燥工艺[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 198-202, 208.
- LIU L N, WANG A J, TIAN G R, et al. Optimization of explosion puffing drying process at variable temperature and pressure for mushroom stem by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 198-202, 208.

(上接第 179 页)

- [13] LIU H, LI J Y, YUAN W W, et al. Bioactive components and mechanisms of poplar propolis in inhibiting proliferation of human hepatocellular carcinoma HepG2 cells [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 144: 112364.
- [14] PENG Y L, HU K. Effect of garlic on rats with chronic intermittent hypoxia combined with diabetes mellitus[J]. Molecular Medicine Reports, 2018, 17(4): 6 174-6 184.
- [15] 饶智,陈光宇,谢梦洲,等. 芦根提取物对大鼠急性酒精性肝损伤的保护作用研究[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(1): 95-98.
- RAO Z, CHEN G Y, XIE M Z, et al. Study on the protective effect of Reed root extract on acute alcoholic liver injury in rats[J]. Shi Zhen Chinese Medicine, 2022, 33(1): 95-98.
- [16] MUSTAFA K, YU S, ZHANG W, et al. Screening, characterization, and in vitro-ROS dependent cytotoxic potential of extract from *Ficus carica* against hepatocellular (HepG2) carcinoma cells[J]. South African Journal of Botany, 2021, 138: 217-226.
- [17] 刘甜甜,杨舒涵,颜梅,等. 柠檬提取物和水飞蓟素对大鼠急性酒精性肝损伤的保护作用研究[J]. 西南医科大学学报, 2021, 44(2): 105-109.
- LIU T T, YANG S H, YAN M, et al. Protective effect of lemon extract and silymarin on acute alcoholic liver injury in rats[J]. Journal of Southwest Medical University, 2021, 44(2): 105-109.
- [18] WANG Y S, ZHANG N H, ZHOU J X, et al. Protective effects of several common amino acids, vitamins, organic acids, flavonoids and phenolic acids against hepatocyte damage caused by alcohol [J]. Foods, 2022, 11(19): 3 014.