

胡萝卜热泵干燥工艺优化

Optimization of carrot heat pump drying process by response surface methodology

彭钰航 王广红 孙飞雪 金听祥

PENG Yu-hang WANG Guang-hong SUN Fei-xue JIN Ting-xiang

(郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,
Zhengzhou, Henan 450002, China)

摘要:目的:优化胡萝卜的热泵干燥工艺。方法:在单因素试验基础上,通过 Box-Behnken 试验设计,以色差、复水比和 β -胡萝卜素含量为指标,研究初始温度、干燥温升和切片厚度对胡萝卜干燥品质的影响。建立回归方程,分析 3 个独立因素之间交互作用对响应值的影响,得到胡萝卜热泵干燥的最佳干燥工艺参数以及在此条件下的预测值,最后通过实验与预测值进行对比验证,确定最佳参数组合。结果:胡萝卜热泵干燥的最优工艺参数为:初始温度 54.1 $^{\circ}\text{C}$,干燥温升 9.25 $^{\circ}\text{C}$,切片厚度 3.8 mm,此条件下的胡萝卜色差值为 9.759,复水比为 6.196, β -胡萝卜素含量为 34.378 mg/100 g,其干制品色泽呈鲜亮橙红色,复水比高, β -胡萝卜素保留量高。结论:响应面法可确定胡萝卜热泵干燥的最佳工艺参数,使胡萝卜干制品的品质最佳。

关键词:热泵干燥;响应面法;工艺优化;色差;复水比; β -胡萝卜素

Abstract: Objective: This study focuses on optimizing the heat pump drying process of carrot. Methods: On the basis of single factor experiment, Box-Behnken experiment was designed. Color difference, rehydration ratio and β -carotene content were used to study the effects of initial temperature, drying temperature rise and slice thickness on carrot drying quality. The regression equation was established, and the interaction between three independent factors on the response was analyzed. The optimal drying process parameters and the predicted values of carrot heat pump

drying were obtained. Finally, the optimal parameters were determined by comparing the experimental results with the predicted values. Results: The optimal process parameters of carrot heat pump drying were as follows: the initial and drying temperature were 54.1 $^{\circ}\text{C}$ and 9.25 $^{\circ}\text{C}$ respectively, and the slice thickness was 3.8 mm. Under the control of these conditions, the color difference value of carrot was 9.759, the rehydration ratio was 6.196, with the content of β -carotene of 34.378 mg/100 g. The dried product was bright orange red, and the rehydration ratio and the retention of β -carotene were high. Conclusion: Response surface method can determine the best process parameters of carrot heat pump drying, and help to obtain the best quality of carrot dried products.

Keywords: heat pump drying; response surface method; process optimization; the color difference; rehydration ratio; carotenoids

胡萝卜因其富含多种维生素、类胡萝卜素、花青素、钙、铁等营养成分,兼具抗氧化、促进生长发育、保护视力、抗癌防癌、提高免疫、促消化等^[1-2]功能,素有“小人参”之称。中国是胡萝卜种植大国,产量和出口量占全球 40%,新鲜胡萝卜含水量为 86%~95%,容易腐烂。脱水加工是胡萝卜的主要加工方式之一,加工后的产品不仅可以延长货架期,方便运输和贮藏,还能有效减少腐烂造成的资源浪费^[3]。

热泵干燥技术因具有操作简单、高效节能、环境友好等优点,被广泛应用于干燥领域。干燥工艺参数对热泵干燥品质有较大影响^[4],同时也对节能降耗有影响。周韵等^[5]使用响应面法研究了热风微波耦合干燥工艺参数对胡萝卜干燥速率和干燥品质的影响。毕金峰等^[6]使用响应面法对胡萝卜变温压差膨化干燥的工艺参数进行了优化。沈文龙等^[7]通过响应面法得到了杏鲍菇的最佳热泵干燥工艺为初始温度 50 $^{\circ}\text{C}$,温度增量 7 $^{\circ}\text{C}$,铺料密度

基金项目:河南省研究生教育创新培养基地项目(编号:YJS2021JD05);河南省大学生创新创业项目(编号:S202110462074)

作者简介:彭钰航,男,郑州轻工业大学讲师,博士。

通信作者:金听祥(1976—),男,郑州轻工业大学教授,博士。

E-mail: txjin@126.com

收稿日期:2021-06-15

2.9 kg/m²。王安建等^[8]使用响应面法对香菇热泵干燥工艺进行了优化,优化结果为温度 54 ℃、风速 3 m/s、装载量 1 176 g/m²。王梅等^[9]使用响应面法优化了山药脆片的干燥工艺,其最佳干燥工艺条件为切片厚度 3.8 mm、烫漂时间 4 min 20 s、干燥温度 60 ℃、干燥时间 2.0 h。龙成树等^[10]建立了响应面法优化桑叶热泵干燥速率模型,得到了最优的工艺参数为干燥温度 64.20 ℃、风速 2.40 m/s、热烫时间 2.0 min、干燥耗时 2.25 h。钱革兰等^[11]使用响应面法分析热风微波耦合干燥胡萝卜片的形变,得到最优参数为微波功率密度 1.9 W/g,热风温度 65 ℃,胡萝卜片厚度 5 mm,可使体积保留率提高 10%。文章拟采用 Box-Behnken 设计,研究初始温度、干燥温升和切片厚度 3 个工艺参数对产品色差、复水比和 β -胡萝卜素含量的影响,确定最佳的干燥工艺参数,旨在为实际生产过程提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

采用同一批长度大致相同、直径约 4 cm、成熟适度未木质化、无病虫无萎缩、无糠心、皮薄肉厚、颜色呈鲜红色或橙色的新鲜胡萝卜。

1.2 仪器与设备

空气能热泵箱式一体节能烘干机:CG-05HA 型,循环系统为半开式,可根据需要调节不同阶段的干燥温度、相对湿度以及干燥时间,广东创陆制冷科技有限公司;

质构仪:TA. TOUCH 型,上海保圣实业发展有限公司;

高速多功能粉碎机:200T 型,永康市铂欧五金制品有限公司;

快速水分仪:FBS-750A 型,厦门弗布斯检测设备有限公司;

分光测色仪:YS3060 型,深圳市三恩时科技有限公司;

玻璃砂芯过滤装置:1 000 mL,郑州利研仪器有限公司;

低温恒温槽:DC-3010 型,温度波动 ± 0.5 ℃,江苏天翎仪器有限公司;

多功能切菜机:QP-1102 型,中山市百客思电器有限公司;

精密电子天平:ES500 型,精度为 0.001 g,天津市德安特传感技术有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 热泵干燥流程

新鲜胡萝卜切片→称重→开水热烫 3.5 min→冷水中冷却,拭干水分→铺放于筛盘上→热泵干燥机干燥→每隔 30 min 测量胡萝卜质量→干燥至样品相邻减重低于 0.02 g/100 g→包装贮藏

干燥过程分两个阶段,第一阶段的温度为初始温度,物料在初始温度下干燥至含水率 25%~30%时进入第二阶段,第二阶段的温度为初始温度+温升值。

1.3.2 响应面试验 根据预试验,确定以色差值、复水比、 β -胡萝卜素含量为响应值,初始温度、干燥温升及切片厚度为因素,建立三因素三水平的 Box-Behnken 中心组合试验。

1.4 产品指标测定

1.4.1 色差 根据文献^[12]修改如下:使用测色仪进行测定,每种样品取 3 次样,每样旋转 3 次不同角度,结果取平均值。按式(1)计算色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2}, \quad (1)$$

式中:

ΔE ——色差值;

L^* ——亮度值,0~100;

a^* ——红色度,-80~100;

b^* ——黄色度,-80~100。

1.4.2 复水比 分别取各组干燥成品 2 g,放入 250 mL 烧杯中,用水量为 200 mL,90 ℃水浴 20 min,取出沥水,擦干表面水分后称重,按式(2)计算复水比。

$$R_f = \frac{G_f}{G_g}, \quad (2)$$

其中:

R_f ——复水比,g/g;

G_f ——样品复水后沥干质量,g;

G_g ——干制品试样质量,g。

1.4.3 β -胡萝卜素含量 根据文献^[13-14],按式(3)计算 β -胡萝卜素含量。

$$N = \frac{x \times 25 \times 50}{m \times (1 - k)}, \quad (3)$$

式中:

N —— β -胡萝卜素含量,mg/g;

x ——利用标准曲线求得的 β -胡萝卜素含量,mg/mL;

m ——胡萝卜粉质量,g;

k ——干基水分含量,%。

2 结果与分析

2.1 响应面试验结果及数据分析

2.1.1 响应面试验结果 在前期预试验的基础上,以色差值、复水比、 β -胡萝卜素含量为响应值,以初始温度、干燥温升、切片厚度为自变量,建立三因素三水平中心组合试验设计,因素水平表见表 1,试验设计与结果见表 2。

2.1.2 回归方程拟合及方差分析 采用 Design-Expert 10.0 统计软件对所得数据进行回归分析,得到回归方程为:

表 1 试验因素与水平表

Table 1 Table of test factors and levels

水平	X ₁ 初始温度/℃	X ₂ 干燥温升/℃	X ₃ 切片厚度/mm
—1	50	5	3
0	55	10	4
1	60	15	5

$$Y_1 = 9.88 + 0.57X_1 + 0.18X_2 + 0.33X_3 + 0.28X_1X_2 + 0.57X_1X_3 + 0.15X_2X_3 + 1.32X_1^2 + 0.47X_2^2 - 0.095X_3^2,$$
 (4)

$$Y_2 = 6.02 - 0.54X_1 - 0.017X_2 - 0.46X_3 - 0.16X_1X_2 - 0.25X_1X_3 + 0.28X_2X_3 - 0.39X_1^2 - 0.88X_2^2 + 0.14X_3^2,$$
 (5)

$$Y_3 = 35.32 + 2.71X_1 - 0.56X_2 + 1.07X_3 + 1.65X_1X_2 + 1.66X_1X_3 + 2.40X_2X_3 + 0.17X_1^2 + 0.94X_2^2 - 10.17X_3^2.$$
 (6)

由表 3 可知,回归方程的模型决定系数均>0.8,说明干燥初始温度、干燥温升和切片厚度对胡萝卜干制品影响显著,校正系数均>0.7,说明模型的拟合度较好,可以反映响应面曲线的变化趋势,能较好地预测胡萝卜的热泵干燥过程。离散系数都较小,说明干燥试验具有较好的精确性和可靠性。干燥温升对胡萝卜干燥后的色差及复水比影响较大,可能是因为第二阶段温度过高使胡萝卜切片的表面细胞发生不可逆转变化,颜色变深,细胞渗透性减小。初始温度对β-胡萝卜素含量影响较大,可能

是因为β-胡萝卜素在干燥初期较容易流失,合适的初始温度更容易保留β-胡萝卜素。

2.1.3 响应面图分析 由图 1 可知,色差值随初始温度的升高呈先降低再升高的趋势,当初始温度为 54~56℃时,色差值最低;随着干燥温升的增大,色差值先降低后升高,当干燥温升为 9~11℃时,色差值最低;切片厚度对色差值的影响不显著。热泵干燥过程中,由于干燥时间长,温度过高,易使蔬菜中的色素物质和营养物质加速氧化降解^[15]。由于胡萝卜是热敏性根菜类蔬菜,在干燥过程中会发生褐变,初始温度对酶促褐变和非酶促褐变均有较大影响,当初始温度为 54~56℃时,酶促褐变和非酶促褐变的现象减少,干制品的色泽变化小^[3]。

由图 2 可知,切片厚度一定时,复水比随初始温度的升高呈先升高再降低的趋势,当初始温度为 54~56℃时,复水比最高。这是因为随着初始温度的升高,胡萝卜组织结构易出现多孔疏松状态,体积逐渐膨化,导致复水过程中吸水量增加,复水终点时水分含量值变大,复水比增加。初始温度不断升高后,胡萝卜片内部毛细管与细胞的萎缩变形增大,初始温度对物料组织结构的破坏作用增加,复水难度增加,导致复水比减小^[16]。随着干燥温升的增大,复水比先升高再降低,当干燥温升为 9~11℃时,复水比最高。随着切片厚度的增加,复水比逐渐减小。因此干燥温升对复水比的影响最为显著,其次为初始温度。

由图 3 可知,β-胡萝卜素含量随初始温度的升高而缓

表 2 试验设计及结果

Table 2 Experimental design and results

试验号	X ₁ 初始温度/℃	X ₂ 干燥温升/℃	X ₃ 切片厚度/mm	Y ₁ 色差值	Y ₂ 复水比	Y ₃ β-胡萝卜素含量/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)
1	0	—1	1	9.135 6	4.418 8	25.247 9
2	—1	0	—1	9.674 9	6.637 6	19.637 3
3	1	0	—1	10.538 4	5.706 3	27.161 1
4	1	0	1	10.665 0	4.411 6	34.322 4
5	1	—1	0	11.811 0	4.128 0	38.310 9
6	0	0	0	11.365 1	5.826 0	38.359 6
7	0	—1	—1	10.105 6	6.023 0	29.594 3
8	—1	1	0	14.968 7	5.181 6	34.990 3
9	0	0	0	11.365 1	5.826 0	31.359 6
10	—1	0	1	10.537 0	6.344 6	20.152 6
11	0	1	1	10.693 2	5.097 4	27.389 6
12	0	0	0	9.555 5	6.112 9	28.120 1
13	0	0	0	10.622 7	6.224 7	35.560 9
14	1	—1	0	10.816 5	4.631 4	34.560 9
15	0	0	0	11.487 0	6.120 1	30.405 4
16	—1	—1	0	11.077 8	5.057 8	40.858 6
17	0	1	—1	10.078 3	5.861 0	22.123 9

慢升高;随着干燥温升的增大, β -胡萝卜素含量无显著变化;随着切片厚度的增加, β -胡萝卜素含量先升高后降低,当切片厚度为 3.5~4.0 mm 时, β -胡萝卜素含量最高,切

片厚度对 β -胡萝卜素含量影响最为显著。 综上,当初始干燥温度为 54~56 $^{\circ}\text{C}$,干燥温升为 9~11 $^{\circ}\text{C}$,切片厚度为 3.5~4.0 mm 时,胡萝卜干制品的色差

表 3 方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance

方差来源	色差				复水比				β -胡萝卜素含量			
	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值
模型	13.97	9	6.80	0.009 6	8.82	9	15.06	0.000 9	552.72	9	4.53	0.002 9
X_1	2.61	1	11.46	0.011 7	2.36	1	36.24	0.000 5	58.95	1	4.35	0.754 0
X_2	0.25	1	1.10	0.329 5	0.002	1	0.036	0.854 2	2.48	1	0.18	0.681 8
X_3	0.87	1	3.80	0.092 2	1.69	1	26.02	0.001 4	9.23	1	0.68	0.436 4
X_1X_2	0.30	1	1.33	0.285 9	0.10	1	1.52	0.258 5	10.95	1	0.81	0.398 5
X_1X_3	1.28	1	5.62	0.049 6	0.25	1	3.85	0.090 4	11.04	1	0.82	0.396 6
X_2X_3	0.07	1	0.37	0.559 7	0.31	1	4.78	0.065 0	23.08	1	1.70	0.233 1
X_1^2	7.34	1	32.16	0.000 8	0.64	1	9.81	0.016 6	0.12	1	8.84E-003	0.927 7
X_2^2	0.93	1	4.07	0.083 5	3.28	1	50.45	0.000 2	3.71	1	0.27	0.617 1
X_3^2	0.04	1	0.17	0.694 5	0.09	1	1.31	0.289 7	435.80	1	32.17	0.000 8
残差	1.60	7			0.46	7			94.82	7		
失拟项	0.28	3	0.29	0.831 7	0.32	3	3.14	0.149 0	69.25	3	3.61	0.123 4
误差项	1.31	4			0.14	4			25.57	4		
总和	15.56	16			9.28	16			647.53	16		

[†] $R^2_{\text{色差}}=0.897\ 4, R^2_{\text{复水比}}=0.950\ 9, R^2_{\beta\text{-胡萝卜素含量}}=0.893\ 6; R^2_{\text{Adj 色差}}=0.745\ 5, R^2_{\text{Adj 复水比}}=0.887\ 8, R^2_{\text{Adj } \beta\text{-胡萝卜素含量}}=0.765\ 3; CV_{\text{色差}}=4.47\%, CV_{\text{复水比}}=5.64\%, CV_{\beta\text{-胡萝卜素含量}}=11.85\%。$

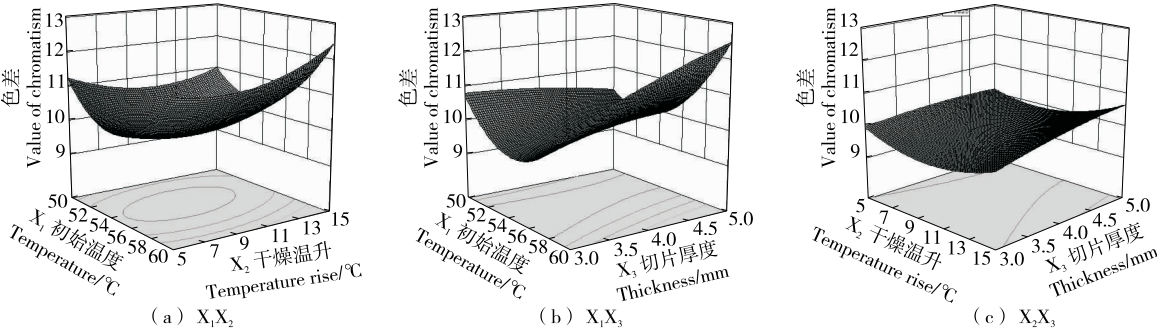


图 1 各因素交互作用对胡萝卜色差影响的响应面图

Figure 1 Response surface diagram of the interaction of different factors on carrot chromatic aberration

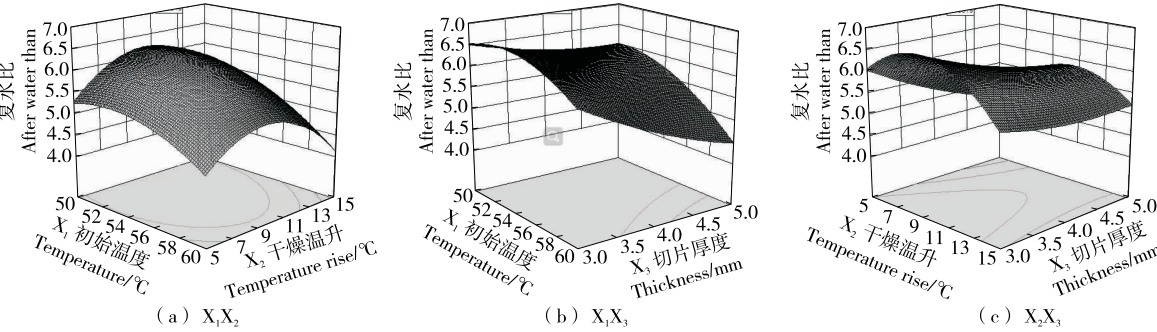
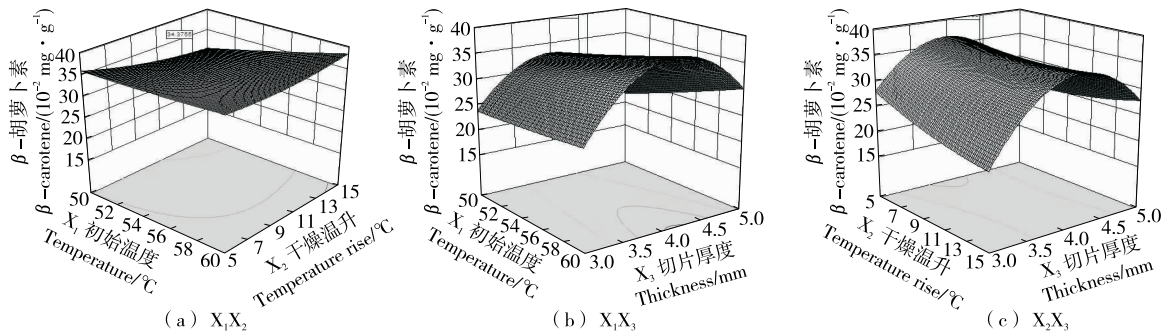


图 2 各因素交互作用对胡萝卜复水比影响的响应面图

Figure 2 Response surface diagram of the interaction of various factors on carrot rehydration ratio

图3 各因素交互作用对 β -胡萝卜素含量影响的响应面图Figure 3 Response surface diagram of interaction of various factors on β -carotene content

值最小,复水比最高, β -胡萝卜素含量最高。

2.2 验证实验

用 Design-Expert 10.0 软件对回归方程求解,得到胡萝卜热泵干燥的最优工艺参数为初始温度 54.10°C ,干燥温升 9.25°C ,切片厚度 3.8 mm ,此条件下理论预测的胡萝卜色差值为 9.759 ,复水比为 6.196 , β -胡萝卜素含量为 $34.378\text{ mg}/100\text{ g}$ 。结合实际将干燥条件调整为初始温度 54°C ,干燥温升 9.3°C ,切片厚度 $(3.8\pm 0.1)\text{ mm}$,在此条件下进行 3 次平行验证实验,实测胡萝卜色差值为 9.616 ± 0.2 ,复水比为 6.251 ± 0.1 , β -胡萝卜素含量为 $(33.527\pm 0.500)\text{ mg}/100\text{ g}$,与理论预测值相比,相对误差分别为 1.465% , 0.877% , 2.475% ,说明可以利用响应面对胡萝卜热泵干燥工艺进行预测与分析。

3 结论

采用响应面法,研究了初始温度、干燥温升和切片厚度对胡萝卜干燥产品色差、复水比和 β -胡萝卜素含量的影响。结果表明:初始温度是影响色差的显著因素,干燥温升和切片厚度是次显著因素;干燥温升是影响复水比的显著因素,初始温度和切片厚度是次显著因素;切片厚度是影响 β -胡萝卜素含量的显著因素,初始温度和干燥温升是次显著因素。胡萝卜热泵干燥的最佳工艺为初始温度 54.10°C ,干燥温升 9.25°C ,切片厚度 3.8 mm ,此条件下胡萝卜色差值为 9.759 ,复水比为 6.196 , β -胡萝卜素含量为 $34.378\text{ mg}/100\text{ g}$ 。后续可在不同的阶段改变不同的相对湿度或将干燥分成更多的阶段,更进一步细化参数,在保证干燥品质的同时最大限度降低能耗。

参考文献

- [1] 秦学磊,张国治,聂波,等.不同干燥工艺对胡萝卜品质影响的研究[J].粮食加工,2017,42(6):49-55.
QIN Xue-lei, ZHANG Guo-zhi, NIE Bo, et al. Study on the effects of different drying methods on the quality of carrots[J]. Grain Processing, 2017, 42(6): 49-55.
- [2] 陈瑞娟,毕金峰,陈芹.胡萝卜的营养功能、加工及其综合利用研究现状[J].食品与发酵工业,2013,39(10):201-206.

CHEN Rui-juan, BI Jin-feng, CHEN Qin. Research status nutritional and healthy function of carrot and its processing and comprehensive utilization[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(10): 201-206.

- [3] 马国军,刘英,李武强,等.基于响应面法优化胡萝卜切片远红外干燥工艺[J].中国农机化学报,2019,40(12):106-112.
MA Guo-jun, LIU Ying, LI Wu-qiang, et al. Optimization of carrot slice deep infrared drying process based on response surface methodology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 106-112.
- [4] 王慧.胡萝卜热风干燥特征及工艺参数优化的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
WANG Hui. Research on characteristic of carrot butly by hot air drying and optimum of its technology[D]. Huhhot: Inner Mongol University of Technology, 2012.
- [5] 周韵,宋春芳,崔政伟.热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J].农业工程学报,2011,27(2):382-386.
ZHOU Yun, SONG Chen-fang, CUI Zheng-wei. Coupled hot air and microwave drying technology for carrot slices dehydration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 382-386.
- [6] 毕金峰,丁媛媛,白沙沙,等.响应面分析法优化胡萝卜变温压差膨化干燥工艺参数[J].食品科学,2009,30(20):215-219.
BI Jin-feng, DING Yuan-yuan, BAI Sha-sha, et al. Optimization of puffing-drying of carrots at various temperature-pressure differences using response surface methodology[J]. Food Science, 2009, 30(20): 215-219.
- [7] 沈文龙,宋镇,张波,等.杏鲍菇热泵干燥特性及工艺参数优化[J].中国农机化学报,2019,40(10):135-141,168.
CHEN Wen-long, SONG Zhen, ZHANG Bo, et al. Drying characteristics and optimization of process parameters for heat pump drying of Pleurotus eryngii[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 135-141, 168.
- [8] 王安建,刘丽娜,魏书信,等.响应面法优化香菇热泵干燥工艺[J].食品科技,2016,41(3):62-66.
WANG An-jian, LIU Li-na, WEI Shu-xin, et al. Optimization of heat-pump drying process of Lentinus edodes by response surface-

- method[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(3): 62-66.
- [9] 王梅, 雷尊国, 邓禄军, 等. 响应面法优化山药脆片干燥工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 33-37.
- WANG Mei, LEI Zun-guo, DENG Lu-jun, et al. Optimization of drying technology of yam chips by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 33-37.
- [10] 龙成树, 刘清化, 李浩权, 等. 响应面法优化桑叶热泵干燥速率模型[J]. 现代农业装备, 2016(5): 24-32, 49.
- LONG Cheng-shu, LIU Qing-hua, LI Hao-quan, et al. Optimizing heat pump drying rate model of mulberry leaf by using response surface methodology[J]. Modern Agricultural Equipment, 2016(5): 24-32, 49.
- [11] 钱革兰, 崔政伟. 响应面分析热风微波耦合干燥胡萝卜片的形变[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 38-41.
- QIAN Ge-lan, CUI Zheng-wei. Analysis on shrinkage of carrots slices dried by coupling hot air and microwave by response surface methodology[J]. Food & Machinery, 2011, 27(3): 38-41.
- [12] 周新丽, 申炳阳, 张三强, 等. 超声波辅助冷冻干燥对胡萝卜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 196-202.
- ZHOU Xin-li, SHEN Bing-yang, ZHANG San-qiang, et al. Effect of ultrasonic assisted freeze drying on the quality of carrot[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 196-202.
- [13] 陈瑞娟, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜粉品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 48-53.
- CHEN Rui-juan, BI Jin-feng, CHEN Qian-qian, et al. Effects of different drying methods on carrot powder quality[J]. Food Science, 2014, 35(11): 48-53.
- [14] 代亚萍, 邓凯波, 卢旭, 等. 超声波辅助漂烫预处理对太阳能-热泵联合干燥南瓜片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 136-142, 148.
- DAI Ya-ping, DENG Kai-bo, LU Xu, et al. Effect of ultrasonic-assisted blanching pretreatment on the characteristics of solar-heat pump dried pumpkin slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 136-142, 148.
- [15] MARIA A, STEFANO C, VINCENZA C. Experimental evaluation of quality parameters during drying of carrot samples[J]. Food Bioprocess Technol, 2012(5): 118-129.
- [16] 贾梦科, 吴忠, 赵武奇, 等. 气体射流冲击干燥苹果片的响应面试验及多目标优化[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2 695-2 705.
- JIA Meng-ke, WU Zhong, ZHAO Wu, et al. Response surface design and multi-objective optimization of apple slices dried by air-impingement[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(15): 2 695-2 705.

(上接第 145 页)

- [19] 吴钊龙, 林芳, 陈振林, 等. 蚕蛹热泵干燥特性及其动力学模型研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(18): 1-6.
- WU Zhao-long, LIN Fang, CHEN Zhen-lin, et al. Heat pump drying characteristics and kinetic modeling of silkworm pupa[J]. Food Research and Development, 2020, 41(18): 1-6.
- [20] 林姜, 邓彩玲, 徐玉娟, 等. 不同高温热泵干燥条件对龙眼干品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 30-34.
- LIN Xian, DENG Cai-ling, XU Yu-juan, et al. effects of different high temperature heat pump drying conditions on the quality of dried Longan[J]. Food Science, 2014, 35(4): 30-34.
- [21] 张群, 刘伟, 袁洪燕. 不同温度热风干燥对蓝莓果干品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(6): 79-83.
- ZHANG Qun, LIU Wei, YUAN Hong-yan. Effects of hot-air-drying at different temperatures on blueberry quality[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(6): 79-83.
- [22] 张海生, 陈锦屏. 柿饼加工中脱涩和反涩机理的研究[J]. 食品工业科技, 2003(12): 39-40.
- ZHANG Hai-sheng, CHEN Jin-ping. Study on the destringenting and restringenting mechanisms of dried persimmons during its processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003(12): 39-40.
- [23] 白冬红, 张雪丹, 卢昊, 等. 脱涩和干制对柿果抗氧化活性的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(11): 47-52.
- BAI Dong-hong, ZHANG Xue-dan, LU Hao, et al. Effects of destringency and dehydration on antioxidant activities of persimmon fruits[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(11): 47-52.
- [24] 郭婷, 吴燕, 陈益能, 等. 热风干燥温度对大果山楂干燥产品品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 184-188.
- GUO Ting, WU Yan, CHEN Yi-neng, et al. Effect of hot air-drying temperature on the product quality for Malus domeri(Bois) Chev[J]. The Food Industry, 2020, 41(8): 184-188.

(上接第 204 页)

- [16] 周艺萍, 熊智, 李选文, 等. 盐分对新平酸腌菜主发酵期细菌多样性的影响[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 26-32.
- ZHOU Yi-ping, XIONG Zhi, LI Xuan-wen, et al. Effect of salt on bacterial diversity in the main fermentation period of Xinping pickles[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 26-32.
- [17] 张国华, 何国庆. 传统发酵食品中乳酸菌多样性及其功能特性[J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 174-181.
- ZHANG Guo-hua, HE Guo-qing. Diversity and functional characteristics of lactic acid bacteria in traditional fermented food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(9): 174-181.
- [18] 敖晓琳, 张小平, 史令, 等. 四川泡菜中两株优良乳酸菌的鉴定及不同发酵条件对其发酵泡菜品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 152-156.
- AO Xiao-lin, ZHANG Xiao-ping, SHI Ling, et al. Identification of two excellent lactic acid bacteria in Sichuan kimchi and the effect of different fermentation conditions on the quality of fermented kimchi[J]. Food Science, 2011, 32(11): 152-156.