

间歇微波—热风耦合干燥花生工艺 优化及品质研究

Research on process optimization and quality of intermittent
microwave-hot air coupling drying peanut

凌铮铮¹ 任广跃^{1,2} 段续^{1,2} 李琳琳¹

LING Zheng-zheng¹ REN Guang-yue^{1,2} DUAN Xu^{1,2} LI Lin-lin¹

马丽苹¹ 董铁有³ 李新林⁴

MA Li-ping¹ DONG Tie-you³ LI Xin-lin⁴

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心,

河南 洛阳 471023; 3. 河南科技大学农业装备工程学院, 河南 洛阳 471023;

4. 肥西老母鸡食品有限公司, 安徽 合肥 230000)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Zhengzhou, Henan 471023, China; 3. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 4. Feixi Old Hen Food Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China)

摘要:为探究间歇微波—热风耦合干燥花生的最佳工艺参数,借助响应面优化分析方法,以花生干燥速率和干燥能效的综合评分为响应值,确定了花生间歇微波—热风耦合干燥的最佳工艺参数为:热风温度 45 ℃,微波强度 1.25 W/g,微波间歇比 1.10。该条件下,花生间歇微波—热风耦合干燥速率为 0.517 g/min,能效为 0.433 MJ/g,干燥综合评分 0.710,模型误差小于 5%。基于此工艺参数探究该干燥方式对花生脂肪酶活动度、硬度、颜色和脂肪酸组成的影响。结果显示,间歇微波—热风耦合干燥是一种高效的干燥技术,能保证花生的品质。

关键词:间歇微波—热风耦合干燥;花生;工艺优化;品质

Abstract: In order to explore the optimal process parameters of intermittent microwave-hot air coupled peanut drying, the optimal process parameters of peanut intermittent microwave-hot air coupled drying were determined using the response surface optimization analysis method. The comprehensive score of peanut

drying rate and drying energy efficiency as response values. The optimal conditions were as followed: hot air temperature 45 ℃, microwave intensity 1.25 W/g, microwave intermittent ratio 1.10. Under these conditions, it was verified that the peanut intermittent microwave-hot air coupling drying rate was 0.517 g/min, the energy efficiency was 0.433 MJ/g, the comprehensive drying score was 0.710, and the model error was less than 5%. Based on this process parameter, the effects of this drying method on peanut lipase activity, hardness, color and fatty acid composition were explored. The results show that intermittent microwave-hot air coupling drying is an efficient drying technology, which can guarantee the quality of peanuts.

Keywords: intermittent microwave-hot air coupling drying; peanuts; process optimization; quality

基金项目:十三五国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901);国家自然科学基金项目(编号:31671907);智汇郑州·1125聚才计划(编号:2016XT026);河南省科技攻关项目(编号:182102110043)

作者简介:凌铮铮,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1973—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期:2020-07-06

花生作为重要的油料作物,含丰富的油脂和蛋白质,具有极高的营养价值^[1-2]。然而,花生收获期多为高温多雨季节,刚收获的新鲜花生含水量较高,不易贮藏,若不及时进行干燥,在其运输、贮藏和加工过程中,极易造成霉变、酸败,严重制约花生产业的发展^[3-5]。

机械干燥是农产品减损、安全保质的加工技术和重要手段^[6]。目前,花生机械干燥多以热风^{[7]3-7}、热泵^[8]为主,也有学者^[9]对花生的微波干燥进行了初步探索,然而

热风、热泵烘干会造成花生内部水分难以向外扩散迁移,导致干燥时间长、营养成分损失大、能量消耗高^[10-11]等问题;而微波干燥虽极大提高干燥效率,缩短干燥时间,但其干燥均匀性较差,难以保障花生干制品品质^[12]。

间歇微波—热风耦合干燥技术是以微波干燥、热风干燥为基础的组合干燥技术,其通过微波源周期性地对物料施加微波场,以提高物料的干燥速率、降低干燥能耗和保证物料干制品品质;并在整个过程中辅以热风系统,防止物料在微波干燥过程中产生局部过热,导致干制品品质下降^[13-15]。Zhao 等^[16]通过对比 5 种不同干燥方式对胡萝卜片的影响,发现间歇微波—热风耦合干燥具有最短的干燥时间和相对较低的干燥能耗,显著提升了干燥速率。Szadzińska 等^[12]对芹菜进行间歇微波—热风耦合干燥和其他 8 种不同干燥方案,发现间歇微波—热风耦合干燥提高了芹菜的干燥速率,降低了干燥能耗。彭郁等^[17]采用间歇微波—热风耦合对白萝卜进行干燥,发现最优的微波间歇比(t_{on}/t_{off})为 1/4,在此条件下白萝卜干制品的颜色最好,品质得以保证。

近年来,关于组合干燥技术在农产品加工领域的应用愈加广泛,但对于间歇微波—热风耦合干燥花生的报道较少,仅对其干燥特性及能耗进行了简单介绍^[18]。试验拟通过响应面分析探究热风温度、微波强度以及微波间歇比对花生干燥速率、能耗的影响,获得间歇微波—热风耦合干燥的最佳工艺参数。在此基础上,对间歇微波—热风耦合干燥对花生品质(脂肪酶活动度、硬度、颜色、脂肪酸组成)的影响进行测定。以期为花生间歇微波—热风耦合干燥的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜花生:产自河南正阳,脱壳后通过 105 ℃ 加热干燥法^[19]测得花生的初始干基含水率为(0.95±0.05) g/g。

1.1.2 仪器与设备

微波热风耦合干燥试验台(见图 1):实验室自制;

食品物性分析仪:SMS TA.XT Epress Enhanced 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

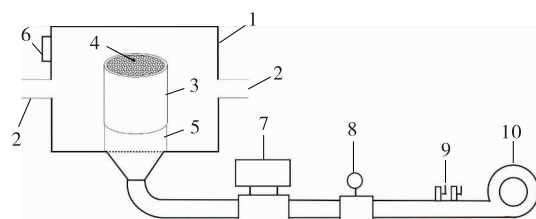
探头:2 mm Cyl. Stainless 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

色差仪:D-110 型,爱色丽色彩技术有限公司;

气相色谱—质谱联用仪:TSQ 9000 型,美国赛默飞世尔科技公司;

色谱柱:SP-2560 型毛细管柱(100 m×0.25 mm×0.2 μm),美国 Sigma 公司;

电热鼓风恒温干燥箱:101 型,北京科伟永兴仪器有限公司。



1. 干燥箱体 2. 微波辐射口 3. 容器 4. 物料 5. 进气口
6. 排气口 7. 温度控制器 8. 流量计 9. 气阀 10. 风机

图 1 微波热风联合干燥试验台结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of microwave hot air combined drying test bench

1.3 试验方法

1.3.1 花生预处理 将新鲜花生洗净、脱壳,挑选(8.91±0.92) mm×(8.47±0.83) mm×(16.01±1.49) mm 大小的花生,放入自封袋冷藏(4 ℃)保存。

1.3.2 间歇微波—热风耦合干燥单因素试验设计 试验前将新鲜花生取出,恢复至室温。由于影响花生微波—热风联合干燥过程的因素主要有热风温度、微波强度和微波的间歇比等。结合相关文献^{[7]11-21 [9, 20]}和试验设计方法,以干燥综合评分(干燥速率、干燥能效)为评价指标,研究热风温度、微波强度和微波间歇比对花生间歇微波—热风耦合干燥评分的影响。分别对每个影响因素进行单因素试验,每个试验组含有 100 g 新鲜花生,每 15 min 对试验组进行称重,直至干燥物料的安全贮藏水分 10% 以下后结束干燥,进行 3 次平行试验。

(1) 热风温度:设置微波强度 1.0 W/g,微波间歇比 0.75,考察热风温度(35, 40, 45, 50, 55 ℃)对干燥综合评分的影响。

(2) 微波强度:设置热风温度 45 ℃,微波间歇比 0.75,考察微波强度(0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 W/g)对干燥综合评分的影响。

(3) 微波间歇比:设置热风温度 45 ℃,微波强度 1.0 W/g,考察微波间歇比(t_{on}/t_{off} 分别为 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25; $t_{off}=60$ s)对干燥综合评分的影响。

1.3.3 间歇微波—热风耦合干燥响应面分析试验设计

根据单因素试验结果,以干燥速率和能耗为响应值,通过 Box-Behnken 试验获得最优花生间歇微波—热风耦合干燥工艺。

1.3.4 干燥参数的测定

(1) 干基含水率:按式(1)计算^[21]。

$$X = \frac{m_t - m}{m}, \quad (1)$$

式中:

X —— t 时刻花生的干基含水率, g/g;

m_t —— t 时刻花生的质量, g;

m ——花生绝干时的质量, g。

(2) 干燥速率:按式(2)计算^[12]。

$$U = \frac{D_m}{DT}, \quad (2)$$

式中:

U ——花生的干燥速率, g/min;

D_m ——花生样品的总失重, g;

DT ——总干燥时间, min。

(3) 能效:指用整合微波—热风耦合干燥设备蒸发花生 1 kg 水所需要的能量,按式(3)计算^[22]。

$$SEC = \frac{P \times t}{\Delta m} \times 10^{-6}, \quad (3)$$

式中:

SEC ——干燥花生的能效, MJ/g;

P ——微波—热风耦合干燥设备各部件的功率, W;

t ——微波—热风耦合干燥设备各部件开启的时间, s;

Δm ——花生干燥前后的质量差, g。

(4) 综合评分:采用隶属度综合评分法,分别计算干燥速率、能耗两项指标的隶属度。当干燥速率越高,干燥时间越短,其隶属度按式(4)计算,当能耗越低,生产加工成本越低,其隶属度按式(5)计算,间歇微波—热风耦合干燥花生的综合得分按式(6)计算,利用 Design-Expert 10 软件优化得到综合评分的最优工艺参数。

$$U = \frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}, \quad (4)$$

$$U = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}}, \quad (5)$$

$$S = aU_1 + bU_2, \quad (6)$$

式中:

U ——隶属度;

S ——综合得分;

$c_{\max}$ ——各指标的最大值;

$c_{\min}$ ——各指标的最小值;

c_i ——第 i 组试验结果;

U_1 ——干燥速率的隶属度;

U_2 ——比能耗的隶属度;

a ——干燥速率的权重系数;

b ——比能耗的权重系数。

综合分析各指标的影响水平,权重系数分别为 $a = 0.5, b = 0.5$ 。

1.3.5 花生品质的测定

(1) 脂肪酶活动度:按 GB/T 5523—2008 执行。

(2) 硬度:参照卢映洁等^[23]的方法,采用穿刺探头,对花生进行穿刺试验。食品物性分析仪设定为测前探头下降速度 0.8 mm/s,测中探头移动速度 0.5 mm/s,测后探头上升速度 0.8 mm/s,最低限度感应力 10 g。单个样品试验点重复测试 5 次求平均值,检测的峰值表示花生

的硬度(g)。

(3) 色差:随机选择每个样品表面的 3 个位置进行测试,记录获得的 L 、 a 和 b 值,通过式(7)计算花生的色差值^[24]。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (7)$$

式中:

ΔE ——色差;

L, L_0 ——分别为干燥前后样品的亮度+/-暗度一值;

a, a_0 ——分别为干燥前后样品的红度+/-绿度一值;

b, b_0 ——分别为干燥前后样品的黄度+/-蓝度一值。

(4) 脂肪酸组成:参照 Aljuhaimi 等^[25]的方法,略作修改,通过气相色谱—质谱法(GC-MS)测定花生样品的脂肪酸组成。取 10 g 花生样品,使用组织粉碎机将其粉碎,准确称取 2.0 g 试样,将其移入到 250 mL 的平底烧瓶中,加入 100 mg 焦性没食子酸,再加入 2 mL 95%乙醇混匀。取 60 mg 混合物移入到具塞试管中,然后加入 4 mL 异辛烷和 0.2 mL 2 mol/L 氢氧化钾甲醇溶液。混合后,将混合物在 60 °C 的水浴中静置 20 min。待冷却至室温,将溶液涡旋 1 min 并充分静置直至混合溶液完全分层。收集上清液并与 1 g 硫酸氢钠混合以除去过量的水和氢氧化钾。涡旋 30 s 后,收集上清液,通过 0.45 μm 有机膜过滤,然后转移到进样瓶中,上机测定。

2 结果与分析

2.1 间歇微波—热风干燥条件优化

2.1.1 热风温度对花生干燥综合评分的影响 由图 2 可知,随着热风温度的升高,干燥速率在 35~45 °C 时迅速增大,当热风温度 > 45 °C 后干燥速率增速变缓,能耗的提升随温度的升高呈线性关系,表明在热风温度 < 45 °C 时,热风温度的升高对干燥速率提高有显著影响,当温度 > 45 °C 时,热风温度的升高对干燥速率的影响减小。这是由于在间歇微波—热风联合干燥中,微波将花生内的水分随温度梯度扩散到花生表面后,热风将其蒸发,但当热风蒸发水分的速率大于扩散到花生表面水分的速率时,干燥

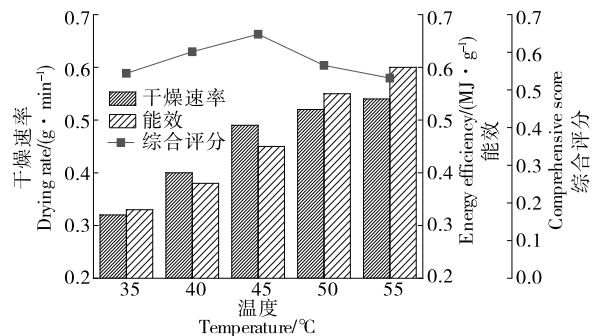


图 2 热风温度对花生干燥综合评分的影响

Figure 2 The effect of hot air temperature on the comprehensive score of peanut drying

速率提升减缓,因而导致干燥的综合评分呈先增高后降低的变化趋势。在 40~50 ℃ 时具有较高的干燥综合评分,在 45 ℃ 时具有最高的干燥综合评分,在 55 ℃ 时具有最低的干燥综合评分,故选择热风干燥温度 40,45,50 ℃ 分别设定为 Box-Behnken 试验的-1,0,1 水平。

2.1.2 微波强度对花生干燥综合评分的影响 由图 3 可知,随着微波强度的升高,在微波强度 0.6~0.8 W/g 时干燥速率变化较缓,当微波强度>1.0 W/g 后干燥速率增速显著提高,能耗的提升与微波强度的升高呈线性关系,表明在微波强度<1.0 W/g 时,微波强度的升高对干燥速率提高影响较小,当微波强度>1.0 W/g 时,微波强度的升高对干燥速率的影响增大。这是由于在间歇微波-热风联合干燥中,在较低微波强度时,热风蒸发花生表面水分起主要作用,故微波强度的提升对干燥速率的影响不明显,随着微波强度的提高,花生内的水分随温度梯度向外扩散的速率加快,导致干燥速率显著提高。因而导致干燥的综合评分呈先增高后降低的变化趋势。在 1.0~1.4 W/g 时具有较高的干燥综合评分,在 1.2 W/g 时具有最高的干燥综合评分,在 0.6 W/g 时具有最低的干燥综合评分,故选择微波强度 1.0,1.2,1.4 W/g 分别设定为 Box-Behnken 试验的-1,0,1 水平。

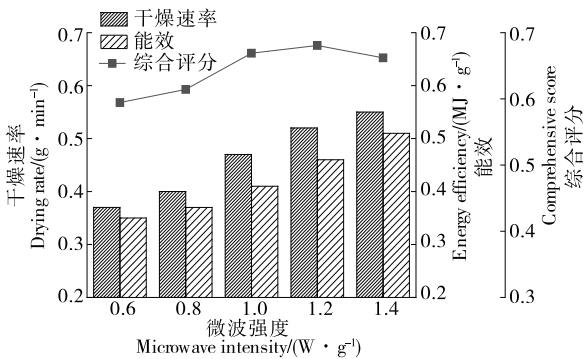


图 3 微波强度对花生干燥综合评分的影响

Figure 3 Effect of microwave intensity on comprehensive score of peanut drying

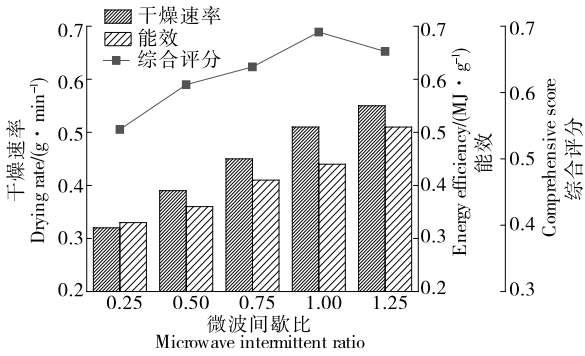


图 4 微波间歇比对花生干燥综合评分的影响

Figure 4 Effect of microwave intermittent ratio on comprehensive evaluation of peanut drying

2.1.3 微波间歇比对花生干燥综合评分的影响 由图 4 可知,随着微波间歇比的提升,干燥速率和能耗的提升均随微波间歇比的提升呈线性关系,但微波间歇比>1.00 时,其能耗有显著上升。因而导致干燥的综合评分呈先增高后降低的变化趋势。在微波间歇比为 0.75~1.25 时具有较高的干燥综合评分,在微波间歇比为 1.00 时具有最高的干燥综合评分,在微波间歇比为 0.25 时具有最低的干燥综合评分,故选择微波间歇比 0.75,1.00,1.25 分别设定为 Box-Behnken 试验的-1,0,1 水平。

2.1.4 响应面分析 试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

采用 Design-Expert 10.0.3 分析软件对表 2 中的各试验组与响应值进行多元回归分析,得出相应的方差分析结果。由表 3 可知,微波强度和微波间歇比对花生耦合

表 1 花生间歇微波-热风耦合干燥 Box-Behnken 试验设计因素及水平

Table 1 Design factor and level of Box-Behnken experiment for intermittent microwave-hot air drying of peanuts

水平	A 热风温度/ ℃	B 微波强度/ (W · g ⁻¹)	C 微波间歇比
-1	40	1.0	0.75
0	45	1.2	1.00
1	50	1.4	1.25

表 2 花生间歇微波-热风耦合干燥 Box-Behnken 试验设计结果

Table 2 Box-Behnken experimental design results of intermittent microwave-hot-air coupled drying of peanuts

试验号	A	B	C	干燥速率/ (g · min ⁻¹)	能耗/ (MJ · g ⁻¹)	综合 评分
1	-1	-1	0	0.392	0.362	0.612 4
2	1	-1	0	0.547	0.511	0.656 1
3	-1	1	0	0.519	0.460	0.679 4
4	1	1	0	0.520	0.462	0.678 0
5	-1	0	-1	0.405	0.369	0.623 9
6	1	0	-1	0.519	0.459	0.681 4
7	-1	0	1	0.523	0.458	0.687 4
8	1	0	1	0.518	0.460	0.678 0
9	0	-1	-1	0.402	0.380	0.604 7
10	0	1	-1	0.449	0.415	0.630 5
11	0	-1	1	0.452	0.409	0.642 1
12	0	1	1	0.512	0.436	0.699 0
13	0	0	0	0.517	0.435	0.708 5
14	0	0	0	0.515	0.438	0.700 6
15	0	0	0	0.511	0.439	0.697 0
16	0	0	0	0.514	0.438	0.702 8
17	0	0	0	0.517	0.434	0.708 3

干燥的综合评分影响极显著($P<0.01$),热风温度对其影响为显著($P<0.05$)。以综合评分为响应值,拟合获得回归方程,剔除不显著项后,最终得到二次回归方程:

$$Y = 0.7 + 0.011A + 0.021B + 0.021C - 0.011AB - 0.017AC - 0.012A^2 - 0.034B^2 - 0.024C^2 \quad (8)$$

模型的 F 值为 34.40, $P<0.01$, 表明该模型极显著; $R^2=0.9894$, $R^2_{Adj}=0.9503$, 表明该模型的拟合度较好, 试验结果与预测结果之间相近的一致性; $CV=1.34\%<5.00\%$, 表明该模型稳定性较好; 失拟项 $P>0.05$, 表明该模型的误差对预测结果的影响较小。

各因素的交互作用对响应值(花生间歇微波—热风耦合干燥的综合评分)的影响如图 5~7 所示, 其中:热风温度和微波强度、热风温度和微波间歇比对花生间歇微波—热风耦合干燥综合评分的交互作用的影响极显著, 微波强度和微波间歇比对花生间歇微波—热风耦合干燥综合评分的交互作用的影响不显著。

基于 Design-Expert 10.0.3 数据分析软件, 间歇微波—热风耦合干燥花生的最佳工艺条件为: 热风温度 45.075 $^{\circ}\text{C}$, 微波强度 1.262 W/g , 微波间歇比 1.110, 在此条件下预测最佳评分为 0.711。考虑到实际操作的便利

表 3 多元回归模型方差分析表[†]

Table 3 ANOVA analysis for the response surface quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.019	9	2.088×10^{-3}	34.40	$<0.0001^{**}$
A	1.010×10^{-3}	1	1.010×10^{-3}	16.65	0.0047^{**}
B	3.668×10^{-3}	1	3.668×10^{-3}	60.44	$<0.0001^{**}$
C	3.570×10^{-3}	1	3.570×10^{-3}	58.83	$<0.0001^{**}$
AB	5.018×10^{-4}	1	5.018×10^{-4}	8.27	0.0238^{*}
AC	1.139×10^{-3}	1	1.139×10^{-3}	18.77	0.0034^{**}
BC	2.235×10^{-4}	1	2.235×10^{-4}	3.68	0.0965
A ²	5.675×10^{-4}	1	5.675×10^{-4}	9.35	0.0184^{*}
B ²	5.000×10^{-3}	1	5.000×10^{-3}	82.39	$<0.0001^{**}$
C ²	2.362×10^{-3}	1	2.362×10^{-3}	38.92	0.0004^{**}
残差	4.248×10^{-4}	7	6.069×10^{-5}		
失拟项	2.620×10^{-4}	3	8.735×10^{-5}	3.67	0.1217
纯误差	1.628×10^{-4}	4	4.070×10^{-5}		
总离差	0.019	16			

[†] ** 表示差异极显著($P<0.01$), * 表示差异显著($P<0.05$); $R^2=0.9894$, $R^2_{Adj}=0.9503$, $CV=1.34\%$ 。

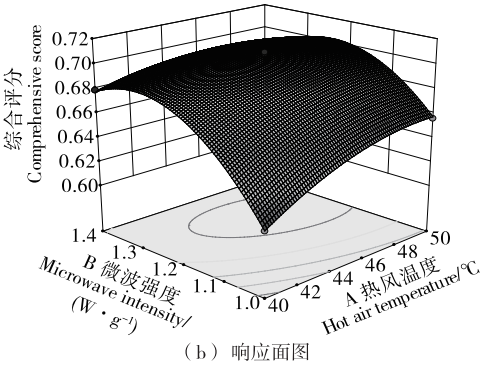
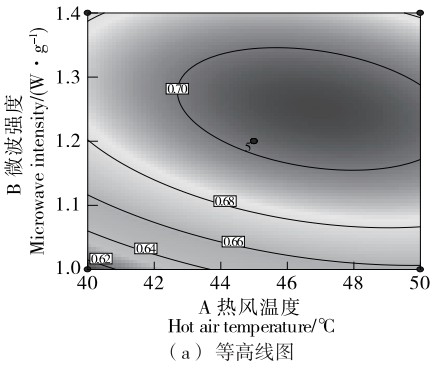


图 5 热风温度和微波强度对综合评分的交互影响

Figure 5 Interactive effect of hot air temperature and microwave intensity on comprehensive score

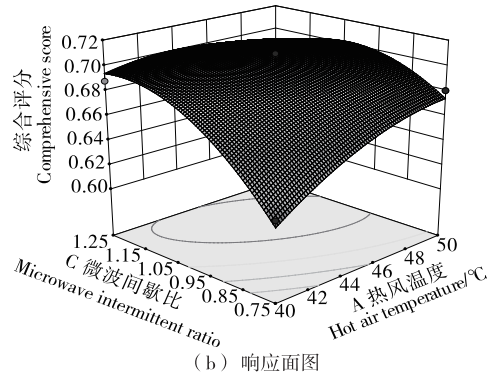
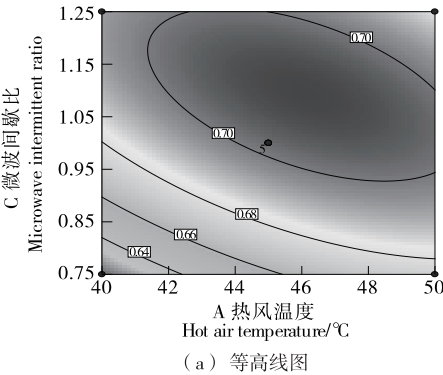


图 6 热风温度和微波间歇比对综合评分的交互影响

Figure 6 The interactive effect of hot air temperature and microwave intermittent ratio on the comprehensive score

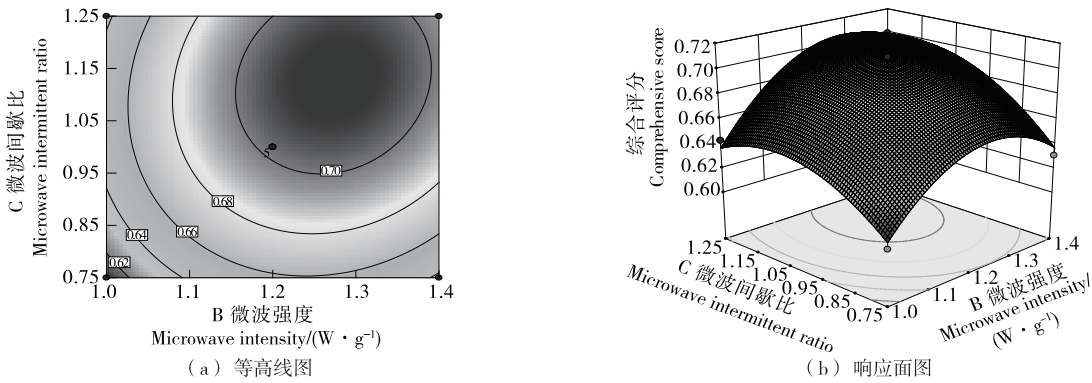


图 7 微波强度和微波间歇比对综合评分的交互影响
Figure 7 The interactive effect of hot microwave intensity and microwave intermittent ratio on the comprehensive score

性,实际条件略有调整:热风温度为 45℃,微波强度为 1.25 W/g、微波间歇比为 1.10。在此条件下进行 3 次验证实验,得到花生间歇微波—热风耦合干燥的干燥速率为 (0.517 ± 0.002) g/min,能耗为 (0.433 ± 0.002) MJ/g,综合评分为 (0.710 ± 0.003) ,与预测结果 0.711 吻合良好。故表明该回归模型能较好地预测花生间歇微波—热风耦合干燥的最佳工艺条件。

2.2 间歇微波—热风耦合干燥花生的品质

2.2.1 脂肪酶活动度 花生的脂肪酶可水解花生的脂肪生成游离脂肪酸,过多的游离脂肪酸会导致花生中的油脂酸败、油脂风味变差、加工损失增加^[26],但会使花生的发芽率降低^[27]。由表 4 可知,经间歇微波—热风耦合干燥的花生脂肪酶活动度降低,与未干燥的花生相比有显著下降($P<0.05$)。这可能是干燥后花生的水分活度降低,从而抑制了脂肪酶活动度^[28]。

2.2.2 硬度 由表 4 可知,间歇微波—热风耦合干燥导致花生硬度降低($P<0.05$),可能是由于热风会加速花生

的传热和传质速率,并破坏花生的微观结构,而且间歇微波可进一步影响花生中蛋白质、脂肪的结构和分子间作用力,从而导致花生的硬度降低^[29]。

2.2.3 色泽 由表 4 可知,经间歇微波—热风耦合干燥后花生的 L^* 、 a^* 和 b^* 值变化显著($P<0.05$)。与未处理的花生相比,经间歇微波—热风耦合干燥处理的变得更暗、更红、更黄。 a^* 和 b^* 值的增加可能是由于干燥过程中发生轻微的美拉德反应,导致较浅的颜色增加。而 L^* 的值降低可能是由于湿热过程中的非酶褐变导致的^[30]。

2.2.4 脂肪酸组成 花生的油脂中的主要脂肪酸是油酸($C_{18:1-9}$ 、46.51%~49.14%)、亚油酸($C_{18:2-8}$ 、32.18%~32.71%)和棕榈酸($C_{16:0}$ 、9.81%~10.54%)。花生油脂中不饱和脂肪酸在脂肪酸组成中占比约 80%。由表 5 可知,经间歇微波—热风耦合干燥后花生的不饱和脂肪酸含量略有下降。这可能是由于在干燥过程中,微波场的介入使花生局部温度略高,导致部分不饱和脂肪酸发生氧化分解^[30]。

表 4 间歇微波—热风耦合干燥花生的脂肪酶活动度、硬度及色差[†]

Table 4 Lipase activity, hardness and color difference of intermittent microwave-hot air coupled drying peanuts

样品	脂肪酶活动度/ (mg·g ⁻¹)	硬度/N	L^*	a^*	b^*	ΔE
干燥后	10.13±0.27 ^b	1 853.92±2.70 ^b	55.37±0.15 ^b	0.41±0.04 ^b	19.18±0.05 ^b	24.32±0.07 ^b
干燥前	17.47±0.51 ^a	2 359.20±20.36 ^a	79.42±0.22 ^a	-1.57±0.05 ^a	16.16±0.07 ^a	0.00±0.00 ^a

[†] 字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)。

表 5 间歇微波—热风耦合干燥花生的脂肪酸组成[†]

Table 5 Fatty acid composition of intermittent microwave-hot-air coupled drying of peanuts

样品	$C_{16:0}$	$C_{18:0}$	$C_{18:1-9}$	$C_{18:2-8}$	$C_{20:0}$
干燥后	10.54±0.14 ^b	2.09±0.07	46.51±0.41 ^b	32.18±0.71	3.04±0.14 ^b
干燥前	9.81±0.17 ^a	1.98±0.12	49.14±0.68 ^a	32.71±0.47	2.61±0.11 ^a

样品	$C_{20:1}$	$C_{22:0}$	$C_{24:0}$	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸
干燥后	1.28±0.12 ^b	1.51±0.11	1.81±0.12 ^b	19.09±0.81 ^b	79.97±0.47 ^b
干燥前	1.09±0.07 ^a	1.42±0.06	1.45±0.05 ^a	17.27±0.67 ^a	82.94±0.68 ^a

[†] 字母不同表示有显著性差异($P<0.05$)。

3 结论

间歇微波—热风耦合干燥可显著提高花生的干燥速率,降低干燥成本,保证花生干燥品质。相较于传统干燥方式,经不同间歇微波—热风耦合干燥条件的花生,其干燥速率、能效和干燥综合评分有显著提升,其中在热风温度 45 ℃,微波强度 1.25 W/g、微波间歇比 1.10 的条件下的干燥综合评分最高。且该条件下干燥的花生脂肪酶活性显著降低,脂肪酸组成无明显改变,保证了花生的干燥品质。虽然试验验证了间歇微波—热风干燥花生的可行性,但由于试验设备的局限性,该干燥方式对花生风味的影响仍需进一步探究。

参考文献

- [1] 王海鸥, 胡志超, 陈守江, 等. 收获时期及干燥方式对花生品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 292-300.
- [2] 孙洁, 杨琴, 沈瑾, 等. 河南省花生产后干燥现状与问题[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2012(10): 41-43.
- [3] 胡志超. 花生生产机械化关键技术[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2017: 14-17.
- [4] 颜建春, 魏海, 谢焕雄, 等. 筒状固定床花生通风干燥性能指标模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 292-302.
- [5] 刘丽, 王强, 刘红芝. 花生干燥贮藏方法的应用及研究现状[J]. 农产品加工(创新版), 2011(8): 49-52.
- [6] 王嘉麟, 谢焕雄, 颜建春, 等. 花生荚果烘干设备研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 12-16.
- [7] 杨潇. 新鲜花生热风干燥试验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2017.
- [8] 王安建, 高帅平, 田广瑞, 等. 花生热泵干燥特性及动力学模型[J]. 农产品加工, 2015(9): 57-60.
- [9] 陈霖. 基于控温的花生微波干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 267-271.
- [10] DENG Li-zhen, PAN Zhong-li, MUJUMDAR A S, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure[J]. Food Control, 2019, 96: 104-111.
- [11] DENG Li-zhen, MUJUMDAR A S, ZHANG Qian, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes: A comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 1 408-1 432.
- [12] SZADZINSKA J, MIERZWA D. Intermittent-microwave and convective drying of parsley[C]// 21st International Drying Symposium (IDS). Valencia: Drying Technology, 2018: 261.
- [13] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN Guang-nan. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [14] KUMAR C, KARIM M A. Microwave-convective drying of food materials: A critical review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(3): 379-394.
- [15] 宋瑞凯, 张付杰, 杨薇, 等. 热风微波耦合干燥系统的设计与试验[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(1): 50-56.
- [16] ZHAO Dan-dan, AN Ke-jing, DING Sheng-hua, et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(8): 2 308-2 318.
- [17] 彭郁, 赵丹丹, 李莱, 等. 白萝卜间歇微波热风耦合干燥过程干燥特性分析(英文)[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 85-93.
- [18] 王招招, 路风银, 朱广成, 等. 花生果微波—热风耦合干燥特性及能耗分析[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(1): 140-146.
- [19] 周四晴, 段续, 任广跃, 等. 厚度控制对怀山药远红外干燥过程中水分迁移的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 75-81.
- [20] 王鹤, 慕松, 李天聪, 等. 基于响应面法的枸杞热风微波联合间歇干燥工艺探究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(2): 134-140.
- [21] 王庆惠, 闫圣坤, 李忠新, 等. 核桃深层热风干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 60-63.
- [22] POOGUNGPLOY P, POOMSA-AD N, WISET L. Control of microwave assisted macadamia drying[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2018, 52(1): 60-72.
- [23] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 热风干燥过程中带壳鲜花生水分迁移特性及品质变化[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 86-92.
- [24] LUCAS B, ZAMBAZI R, COSTA J. Biocompounds and physical properties of acai pulp dried by different methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 335-340.
- [25] ALJUHAIMI F, ÖZCAN M M. Influence of oven and microwave roasting on bioproperties, phenolic compounds, fatty acid composition, and mineral contents of nongerminated peanut and germinated peanut kernel and oils[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 42(2): e13462.
- [26] WANG Wen-jie, JUNG J, MCGORRIN R J, et al. Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 90: 526-534.
- [27] 张瑛, 吴跃进, 高山, 等. 脂肪氧化酶、红米种皮在抗米糠酸败中的作用[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(4): 9-12.
- [28] XU Bin, ZHOU Shi-long, MIAO Wen-juan, et al. Study on the stabilization effect of continuous microwave on wheat germ[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 1-7.

(下转第 227 页)

- sidase: A review[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(8): 1 226-1 235.
- [79] LEE J H, HWANG C E, SON K S, et al. Comparisons of nutritional constituents in soybeans during solid state fermentation times and screening for their glucosidase enzymes and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 362-371.
- [80] HUYNH N T, SMAGGHE G, GONZALES G B, et al. Bioconversion of Kaempferol and Quercetin glucosides from plant sources using *Rhizopus spp*[J]. *Fermentation*, 2018 (4): 102.
- [81] 邓小云, 丁登峰, 戴美红, 等. 植物多糖药理作用研究进展[J]. *中医药导报*, 2006, 12(9): 86-88.
- [82] 黄依佳, 吴剑荣, 朱莉, 等. 蓝藻多糖的分离、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 176-180.
- [83] 王园, 史俊祥, 段云霄, 等. 麸皮多糖微生物发酵工艺优化及其抗炎活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 192-198.
- [84] 张海芸, 贺亮, 李琴, 等. 降解对植物多糖理化性质以及生物活性影响的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2019(3): 15-19.
- [85] 叶水英. 色素植物与植物色素的应用探析[J]. *现代农业科技*, 2018(14): 236-238.
- [86] BUZZINI P. Batch and fed-batch carotenoid production by *Rhodotorula glutinis-Debaryomyces castellii* co-cultures in corn syrup[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 90 (5): 843-847.
- [87] MIURA Y, KONDO K, SAITO T, et al. Production of the carotenoids lycopene, β -carotene, and astaxanthin in the food yeast *Candida utilis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(4): 1 226-1 229.
- [88] NASSERI A T, RASOUL-AMINI S, MOROWVAT M H, et al. Single cell protein: Production and process[J]. *American Journal of Food Technology*, 2011, 6(2): 103-116.
- [89] 钟瑾, 刘一达, 肖愈. 辣椒籽中生物活性成分及其功能活性研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 231-236.
- [90] KHAN M, KHAN S S, AHMED Z, et al. Production of single cell protein from *Saccharomyces cerevisiae* by utilizing fruit wastes[J]. *Nanobiotechnica Universale*, 2010 (2): 127-132.
- [91] DESGRANGES C, VERGOIGNAN C, LEREEC A, et al. Use of solid state fermentation to produce *Beauveria bassiana* for the biological control of European corn borer[J]. *Biotechnology Advances*, 1993, 11(3): 577-587.

(上接第 182 页)

- [13] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业*, 2017, 38(3): 82-87.
- [14] 宋树杰, 张舒晴, 姚谦卓, 等. 熟化甘薯片微波干燥特性及其动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(3): 199-205.
- [15] 刘兵, 李川, 段振华, 等. 罗非鱼片渗透-真空微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 30-35.
- [16] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150-155.
- [17] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 206-210, 216.
- [18] 盘喻颜, 段振华, 刘艳, 等. 火龙果片微波间歇干燥特性及其动力学研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 195-201.
- [19] 刘旺星, 陈雄飞, 余佳佳, 等. 胡萝卜微波干燥特性及动力学模型[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 68-72, 77.
- [20] 李婧怡, 段振华, 刘怡彤, 黄秋葵真空微波干燥特性及其动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(22): 285-289.
- [21] 安可婧, 徐玉娟, 魏来, 等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(9): 30-36.
- [22] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 116-123.
- [23] 田华. 生姜微波干燥动力学模型构建[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(1): 127-132.

(上接第 189 页)

- [29] LYKOMITROS D, DEN BOER L, HAMOEN R, et al. A comprehensive look at the effect of processing on peanut (*Arachis spp.*) texture[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(10): 3 962-3 972.
- [30] LING Bo, OU-YANG Shao-hui, WANG Shao-jin. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Storage stability and physicochemical properties[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 158-165.

(上接第 218 页)

- [40] 刘雪梅, 陈文学, 杨铭, 等. 人参糖肽结合耐力运动对高脂血症大鼠血脂和抗氧化功能的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 255-259.
- [41] 田建明, 韦康, 陈英红, 等. 人参糖肽对大鼠的抗炎和镇痛作用[J]. *中国新药杂志*, 2018, 27(14): 1 658-1 662.
- [42] 狄良娇. 人参糖肽对 A β 25-35 诱导的认知障碍大鼠抗炎与抗凋亡机制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015: 1-3.
- [43] LI Cai, LI Xiang-jun, MIAO Chun-sheng, et al. Ameliorative effect of ginseng glycopeptide on cross-linking of rat tail tendon collagen[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2005, 30(7): 544-547.