

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80782

# 加工助剂对微波泡沫干燥洋槐蜜品质的影响

郝冰婷<sup>1</sup> 王应强<sup>1,2</sup> 师希雄<sup>1</sup> 赵红霞<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 陇东学院农业与生物工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** [目的] 应用微波辅助泡沫干燥技术加工洋槐蜜, 考察各加工助剂对干燥洋槐蜜品质形成的影响。[方法] 选择蛋清粉、大豆分离蛋白、麦芽糊精、 $\beta$ -环糊精、可溶性淀粉及羧甲基纤维素钠 6 种加工助剂, 考察各加工助剂对蜂蜜起泡性能、含水率、吸湿性、色泽、溶解性及感官评分的影响, 并通过响应面优化试验建立蜂蜜品质控制的回归模型。[结果] 蛋清粉的泡沫膨胀性及泡沫稳定性优于大豆分离蛋白; 麦芽糊精以及蛋清粉的吸湿性能优于其他加工助剂, 吸湿性随助剂浓度的增大而减小。当麦芽糊精添加量为 10%, 蛋清粉添加量为 6%, 羧甲基纤维素钠添加量为 1% 时, 洋槐蜜的色差最小; 麦芽糊精、 $\beta$ -环糊精以及蛋清粉均可以缩短蜂蜜粉的溶解时间; 微波泡沫干燥洋槐蜜的最优工艺条件为蛋清粉添加量 6.1%, 麦芽糊精添加量 10.8%, 羧甲基纤维素钠添加量 1%。[结论] 合适的加工助剂和适宜的添加量有助于高品质微波泡沫干燥蜂蜜粉的制备。

**关键词:** 洋槐蜜; 微波辅助泡沫干燥; 助干剂; 稳定剂; 起泡剂

## Effect of processing aids on the quality of microwave foam-dried locust honey

HAO Bingting<sup>1</sup> WANG Yingqiang<sup>1,2</sup> SHI Xixiong<sup>1</sup> ZHAO Hongxia<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agriculture and Bioengineering, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the effect of various processing aids on the quality of locust honey dried by microwave-assisted foam drying technology. [Methods] Six processing aids, including egg white powder, soy protein isolate, maltodextrin,  $\beta$ -cyclodextrin, soluble starch, and sodium carboxymethyl cellulose, were selected to study their effects on foaming properties, moisture content, hygroscopicity, color, solubility, and sensory scores of honey. A regression model for honey quality control was established through response surface optimization experiments. [Results] The foam expansion and foam stability of egg white powder were better than those of soy protein isolate. The hygroscopicity of maltodextrin and egg white powder was better than that of other processing aids, and hygroscopicity decreased with increasing aid concentration. When maltodextrin content was 10%, egg white powder content was 6%, and sodium carboxymethyl cellulose content was 1%, the color difference of locust honey was minimized. Maltodextrin,  $\beta$ -cyclodextrin, and egg white powder all shortened the dissolution time of honey powder. The optimal processing conditions for microwave foam drying of locust honey were 6.1% egg white powder, 10.8% maltodextrin, and 1% sodium carboxymethyl cellulose. [Conclusion] Suitable processing aids and appropriate addition amounts are beneficial for the preparation of high-quality microwave foam-dried honey powder.

**Keywords:** locust honey; microwave-assisted foam drying; drying aid; stabilizer; foaming agent

蜂蜜为蜜蜂采集植物的花蜜或者蜜露, 是一种药食两用且具有丰富的营养成分及生物活性的天然产物<sup>[1]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 32060544)

通信作者: 王应强(1979—), 男, 陇东学院教授, 博士。E-mail: sxxds2008@163.com

师希雄(1977—), 男, 甘肃农业大学教授, 博士。E-mail: sxix77@163.com

收稿日期: 2024-08-07 改回日期: 2025-02-18

引用格式: 郝冰婷, 王应强, 师希雄, 等. 加工助剂对微波泡沫干燥洋槐蜜品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 151-160.

Citation: HAO Bingting, WANG Yingqiang, SHI Xixiong, et al. Effect of processing aids on the quality of microwave foam-dried locust honey[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 151-160.

口服蜂蜜能补中润燥,止痛解毒,外用可生肌、敛疮。现代研究<sup>[2]</sup>表明,蜂蜜具有抗癌、增强免疫、止咳通便、改善记忆、保护神经、强健心肌、抗衰老等作用。目前,蜂蜜直接以液态食用为主,深加工产品较少。蜂蜜粉是一种液体蜂蜜的有效替代品,可以解决液体蜂蜜在食品加工过程中的一些难题,如倾倒液体蜂蜜时会造成浪费和卫生问题,加工的粉末不容易与金属容器发生反应,避免了腐蚀粘连问题,同时还可以与其他食材混合加工成新产品,为食品加工提供了更多的可能性<sup>[3-4]</sup>。

微波干燥是一种以介质损耗为基础的干燥方式,通过离子传导和偶极子转动加热物质分子。在微波作用下,极性分子发生极化并迅速旋转和振动,频繁碰撞和摩擦产生热能,加快干燥速度,提高干燥效率<sup>[5-7]</sup>。由于微波干燥对物料有选择性,微波加热效果在不同物料中表现不一样,因此干燥过程中可能会出现物料受热不均匀的情况,从而影响干燥效果,尤其是一些高黏性物料,如水果、蔬菜汁和蜂蜜等黏性较高的物料一般会难以干燥<sup>[8]</sup>。微波泡沫干燥技术结合了泡沫干燥和微波干燥的优点<sup>[9]</sup>,这种干燥方法提供了高效率、低碳和卓越的质量控制设计,使用可食用的泡沫成分和泡沫稳定剂,从液体食品中开发稳定泡沫,在泡沫形成后加入稳定剂确保形成稳定且均匀的泡沫结构并对产品进行干燥,可以生产出优质的产品。微波泡沫干燥技术具有热量传递快、蒸发面积大、干燥均匀、干燥速度快以及干燥温度低等优点,比较适合于热敏性较强、黏度大、含糖量高、含水率高、需要保留原有风味和色泽的物料干燥<sup>[10-12]</sup>。Affandi 等<sup>[13]</sup>研究表明,当鸡蛋蛋白添加量为 15%,甲基纤维素添加量为 0.69%,发泡时间为 8 min,干燥温度为 60 °C,发泡厚度为 2 mm 时,得到的黑草粉质量最佳。Djaeni 等<sup>[14]</sup>用卡拉胶与蛋清(白蛋白)作为发泡剂和甲基纤维素作为泡沫稳定剂进行混合,添加 20% 蛋清和 10% 甲基纤维素后,水的扩散速度和干燥速度均比无泡沫的卡拉胶干燥快 2 倍;Yüksel 等<sup>[15]</sup>采用微波辅助泡沫垫干燥法制备酸奶粉,随着蛋清蛋白浓度的增加,泡沫膨胀率增加,泡沫稳定性也较好,所得的酸奶粉具有优异的流动特性和所需的粉末特性。Gao 等<sup>[16]</sup>采用微波辅助泡沫垫干燥法生产蓝莓果浆粉末,使用蛋清粉、麦芽糊精以及羧甲基纤维素钠作为发泡剂,在蛋清粉、麦芽糊精以及羧甲基纤维素钠配比为 16:20:1 时获得了较高的干燥速率,生产出了高品质的蓝莓果浆粉。Islam 等<sup>[17]</sup>以麦芽糊精、蛋清蛋白进行微波辅助泡沫干燥菠萝蜜汁,最终获得最佳产率和高质量粉体。

单一的加工助剂在干燥过程中可能达不到理想的干燥效果,会出现干燥不完全、焦糖化反应或干燥后的产品出现结块现象,可在此基础上考虑助干剂、起泡剂及稳定剂的协同作用<sup>[18]</sup>。可供选择的助干剂有麦芽糊精、β-环

糊精、可溶性淀粉,起泡剂有蛋清粉、大豆分离蛋白,稳定剂有羧甲基纤维素钠。助干剂可改善产品的吸湿性,提高干燥效率<sup>[19]</sup>;起泡剂通过产生稳定的泡沫,增加表面积有助于加快干燥过程<sup>[20]</sup>;稳定剂可协同稳定泡沫,从而提高干燥效率,使产品品质更为优良<sup>[21]</sup>。研究拟选择蛋清粉、大豆分离蛋白、麦芽糊精、β-环糊精、可溶性淀粉及羧甲基纤维素钠 6 种加工助剂,考察各加工助剂对蜂蜜起泡性能、含水率、吸湿性、色泽、溶解性及感官评分的影响,并通过试验数据及分析优化出最佳辅料配方,旨在为蜂蜜粉的制备提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料与试剂

洋槐蜂蜜:庆阳市西汇农研科技有限公司;

蛋清粉、大豆分离蛋白、β-环糊精、可溶性淀粉、麦芽糊精、羧甲基纤维素钠:食品级,河南万邦股份有限公司;  
碳酸钾:天津市天力化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

美的微波炉:M1-211A 型,广州美的厨房电器制造有限公司;

精密色差仪:WR-10 型,深圳市威福光电科技有限公司;

多功能搅拌器:SG-5403 型,上海硕光电子科技有限公司;

多功能研磨机:ZJ-033 型,霸州市欧洪家居用品有限公司;

高压均质机:T25 型,艾卡(广州)仪器设备有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 取 100 g 新鲜洋槐蜜,加入热水溶解,冷却,将蛋清粉、麦芽糊精、羧甲基纤维素钠溶解于 100 mL 蒸馏水中,70 °C 加热搅拌 30 min 制备起泡溶液,将蜂蜜与起泡溶液按质量比 1:1 混匀,搅拌 4 min,得到均匀一致的蜂蜜泡沫溶液。

1.3.2 干燥过程 将(200.00±0.01) g 蜂蜜泡沫溶液均匀铺放于微波专用玻璃容器中(长 180 mm、宽 108 mm、高 65 mm),于微波炉中 210 W 干燥 6~15 min,取出,测定样品含水率,加入新的泡沫溶液重复操作,直至目标含水率<5%<sup>[22]</sup>。粉碎,筛分并封装于 PE 材料袋中备用。

1.3.3 单因素试验 以麦芽糊精(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)、β-环糊精(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)、可溶性淀粉(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)、蛋清粉(2%, 4%, 6%, 8%, 10%)、大豆分离蛋白(2%, 4%, 6%, 8%, 10%)、羧甲基纤维素钠(0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%)添加量为因素,考察各因素对洋槐蜜起泡性能、含水率、吸湿性、色泽、溶解性及感官评分的影响,以泡沫膨胀性、泡沫稳定性以及感官评分为指标确定最佳的辅料比。

1.3.4 响应面优化试验 在单因素试验基础上,以蛋清

粉、麦芽糊精、羧甲基纤维素钠添加量为考察因素,以泡沫膨胀性、泡沫稳定性及感官评分为评价指标,设计三因素三水平的响应面试验。

### 1.3.5 指标测定

(1) 膨胀性:根据文献[23],按式(1)计算膨胀率。

$$F_E = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$F_E$ ——膨胀率,%;

$V_1$ ——起泡蜂蜜的体积, $\text{cm}^3$ ;

$V_0$ ——未起泡蜂蜜的体积, $\text{cm}^3$ 。

(2) 泡沫稳定性:用100 mL量筒量取起泡蜂蜜溶液100 mL,室温下放置3 h,每隔30 min测定体积减少量<sup>[24]</sup>,按式(2)计算泡沫稳定性。

$$F_S = \frac{V_2 - \Delta V}{V_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$F_S$ ——泡沫稳定性,%;

$\Delta V$ ——间隔30 min时泡沫体积的减少量,mL;

$V_2$ ——起泡蜂蜜的初始体积,mL。

(3) 含水量:按GB 5009.3—2016执行,按式(3)计算水分含量。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$X$ ——水分含量,g/100 g;

$m_1$ ——烘干前样品和称量瓶的质量,g;

$m_2$ ——烘干后样品和称量瓶的质量,g;

$m$ ——样品质量,g。

(4) 吸湿率:根据文献[25],按式(4)计算吸湿百分率。

$$A_r = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$A_r$ ——吸湿百分率,%;

$m_1$ ——蜂蜜粉吸湿前质量,g;

$m_2$ ——蜂蜜粉吸湿后质量,g。

(5) 色泽:根据文献[26],按式(5)计算色差。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}, \quad (5)$$

式中:

$\Delta E$ ——色差;

$\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ ——蜂蜜干燥前后 $\Delta L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值差值。

(6) 溶解时间:取10 g蜂蜜粉于200 mL烧杯中,加入100 mL 25℃水,低速搅拌,计算加水开始至完全溶解所需时间<sup>[27]</sup>。

(7) 感官评价:邀请10位专业人员组成感官评价小组,参照表1进行评价,满分100分。

表1 蜂蜜粉感官评价标准

感官指标	评分标准	分数
香气(20分)	柔和适中的香气	20~15
	香气较淡或较浓	15~10
	无明显香味	10~5
	有异味	5~0
色泽(20分)	微黄	20~15
	黄色	15~10
	暗黄	10~5
	白色	5~0
滋味(20分)	甜度适宜,有蜂蜜风味	20~15
	过甜或甜度稍差	15~10
	缺乏应有滋味	10~5
	滋味不好,有明显异味	5~0
形态(20分)	粉末粗细均匀,无结块	20~15
	粉末有轻微结块	15~10
	粉末粗细不均匀,有些许结块	10~5
	粉末结块严重	5~0
溶解性(20分)	全部溶解	20~15
	基本溶解,但溶解时间长	15~10
	少量不溶解	10~5
	有较多不溶物	5~0

## 1.4 数据分析与处理

采用Design-Expert 10进行响应面试验设计与分析,采用Origin 2021软件绘图,各指标重复测定3次,取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 加工助剂对洋槐蜜起泡性能的影响

由图1可知,随着静置时间的延长,蛋清粉的泡沫稳定性优于大豆分离蛋白。随着搅拌时间的延长,蛋清粉的泡沫膨胀性高于大豆分离蛋白。因此,选取蛋清粉进行后续试验。

### 2.2 加工助剂对干燥洋槐蜜品质的影响

2.2.1 含水率 由图2可知,蜂蜜粉的含水率随加工助剂添加量的增加而降低,说明助干剂能有效降低蜂蜜粉中的含水率。蛋清粉和大豆分离蛋白对蜂蜜粉中含水率影响不同,蛋清粉添加量为6%时,蜂蜜粉中含水率最低,为2.2%。随着大豆分离蛋白添加量的增加,蜂蜜粉中含水率降低;当羧甲基纤维素钠添加量为1%时,蜂蜜粉中含水率最低,为3.17%。

2.2.2 吸湿率 由图3可知,吸湿阶段,由于助干剂的添加量较小所以吸湿性较大,当助干剂添加量增大时,吸湿

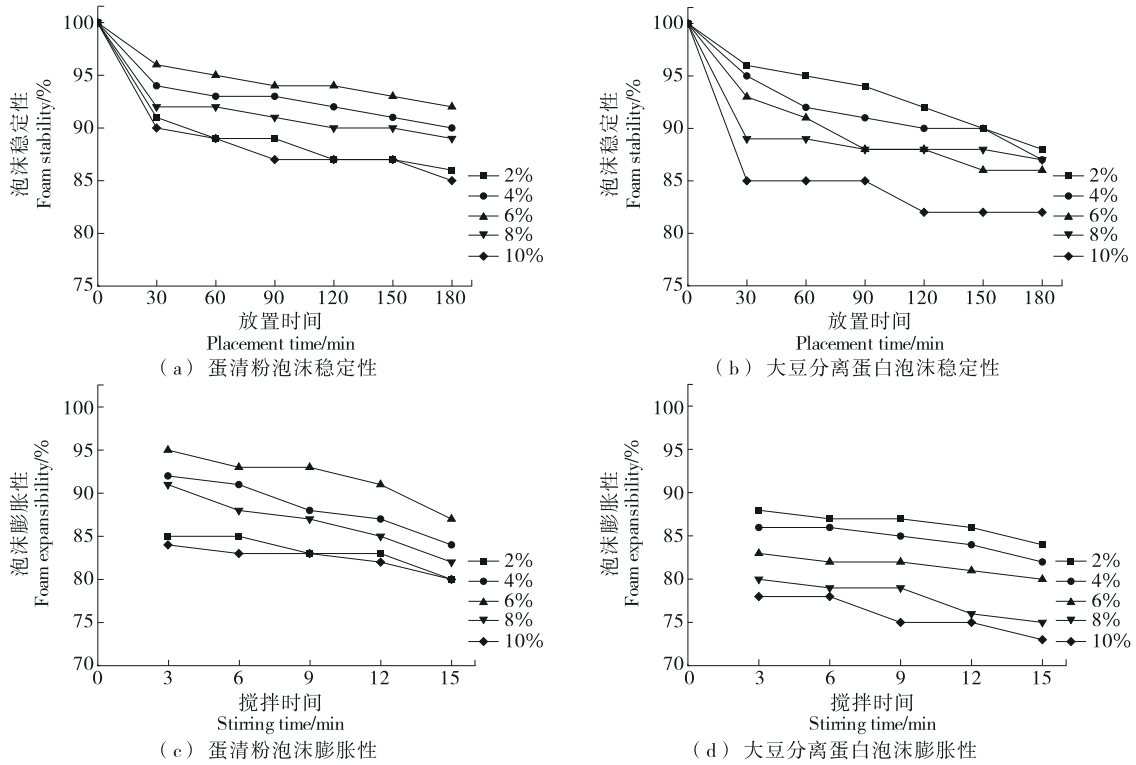


图 1 加工助剂对洋槐蜜起泡性能的影响

Figure 1 Effect of processing aids on foaming properties of locust honey

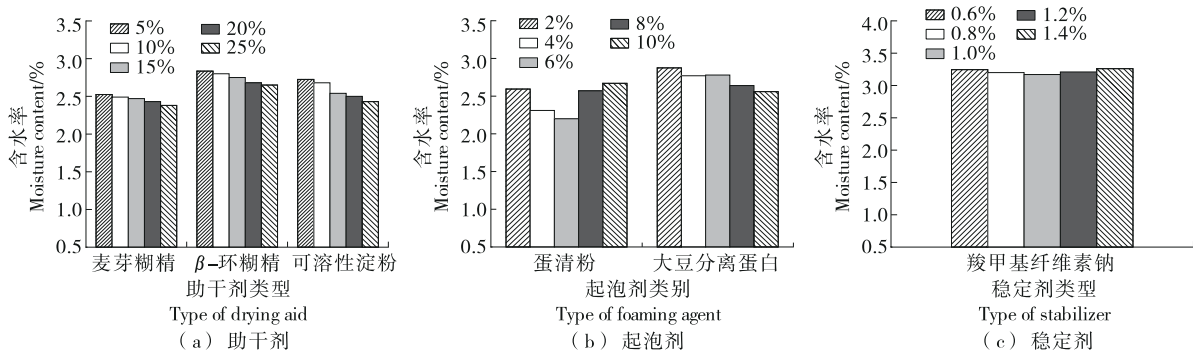


图 2 加工助剂对蜂蜜粉含水率的影响

Figure 2 Effect of processing aids on moisture content of honey powder

性能逐渐减小。其中,麦芽糊精的吸湿性最优。蛋清粉的吸湿性能优于大豆分离蛋白,羧甲基纤维素钠的吸湿性随着添加量的增大而发生改变,但添加量过大会使最终的产品出现糊精的味道,且颜色相对较白,所以在确定加工助剂添加量时需综合考虑。

2.2.3 色泽 由表 2 可知,未添加加工助剂的洋槐蜜干制后  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值分别为 59.76, 13.10, 46.65。助干剂中添加麦芽糊精的蜂蜜粉整体色泽优于其他两种助干剂,  $L^*$  表现出较强的亮度,  $a^*$ 、 $b^*$  值较低,说明干燥时添加麦芽糊精后未加快美拉德反应,具有很好的护色作用,添加

量为 10% 的  $\Delta E$  最小,为  $1.20 \pm 0.017$ 。起泡剂中添加蛋清粉的蜂蜜粉色泽优于大豆分离蛋白,表现出的  $L^*$  值较大,说明干燥后的蜂蜜粉具有较亮的色泽。由于干燥时泡沫厚度的增加使干燥时间延长,温度升高,蜂蜜与蛋白质发生非酶促褐变反应导致  $a^*$ 、 $b^*$  值增大<sup>[28]</sup>,  $\Delta E$  也随干燥时间的延长不断增大<sup>[29]</sup>,起泡剂组蛋清粉的  $a^*$ 、 $b^*$  值和  $\Delta E$  均低于大豆分离蛋白,说明适当添加蛋清粉可提高蜂蜜泡沫果浆和蜂蜜粉的亮度、色度<sup>[30]</sup>。添加羧甲基纤维素钠的蜂蜜在干燥过程中也发生了美拉德反应,  $a^*$ 、 $b^*$  值发生了变化,添加量为 1% 时色差最小,感官品质及  $L^*$  值较好。

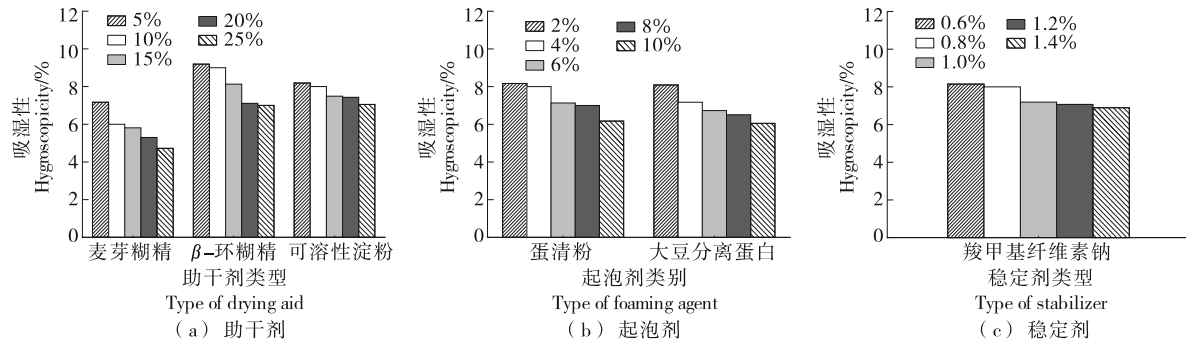


图3 加工助剂对蜂蜜粉吸湿性的影响

Figure 3 Effect of processing aids on hygroscopicity of honey powder

表2 加工助剂对蜂蜜粉色泽的影响†

Table 2 Effect of processing aids on the color of honey powder

加工助剂	添加量/%	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
麦芽糊精	0	57.96±0.015 <sup>d</sup>	13.10±0.021 <sup>a</sup>	46.65±0.015 <sup>a</sup>	
	5	58.79±0.010 <sup>c</sup>	11.48±0.025 <sup>c</sup>	42.62±0.015 <sup>c</sup>	4.17±0.015 <sup>d</sup>
	10	57.70±0.016 <sup>e</sup>	12.36±0.015 <sup>b</sup>	45.72±0.015 <sup>b</sup>	1.20±0.017 <sup>e</sup>
	15	57.66±0.015 <sup>f</sup>	10.73±0.021 <sup>d</sup>	42.43±0.025 <sup>d</sup>	4.84±0.035 <sup>c</sup>
	20	59.54±0.015 <sup>b</sup>	10.22±0.020 <sup>e</sup>	35.25±0.020 <sup>e</sup>	11.86±0.015 <sup>b</sup>
β-环糊精	5	63.92±0.020 <sup>a</sup>	8.15±0.015 <sup>f</sup>	32.59±0.025 <sup>f</sup>	16.05±0.017 <sup>a</sup>
	10	43.56±0.020 <sup>f</sup>	29.92±0.020 <sup>a</sup>	153.03±0.020 <sup>a</sup>	108.66±0.021 <sup>a</sup>
	15	45.92±0.021 <sup>e</sup>	26.05±0.015 <sup>b</sup>	132.33±0.020 <sup>b</sup>	87.49±0.025 <sup>b</sup>
	20	48.12±0.015 <sup>d</sup>	21.63±0.020 <sup>c</sup>	83.15±0.025 <sup>c</sup>	38.75±0.025 <sup>c</sup>
	25	49.87±0.015 <sup>c</sup>	18.28±0.010 <sup>d</sup>	72.34±0.015 <sup>d</sup>	27.43±0.017 <sup>d</sup>
可溶性淀粉	5	67.92±0.025 <sup>a</sup>	13.82±0.015 <sup>e</sup>	54.55±0.015 <sup>e</sup>	12.73±0.010 <sup>e</sup>
	10	48.13±0.025 <sup>c</sup>	22.10±0.015 <sup>d</sup>	91.32±0.021 <sup>b</sup>	45.74±0.026 <sup>b</sup>
	15	47.33±0.026 <sup>d</sup>	22.81±0.010 <sup>c</sup>	59.80±0.021 <sup>e</sup>	23.85±0.015 <sup>d</sup>
	20	43.26±0.010 <sup>f</sup>	33.26±0.020 <sup>a</sup>	95.70±0.021 <sup>a</sup>	52.82±0.020 <sup>a</sup>
	25	52.12±0.020 <sup>b</sup>	19.25±0.010 <sup>c</sup>	65.73±0.020 <sup>d</sup>	21.70±0.015 <sup>e</sup>
蛋清粉	2	43.72±0.020 <sup>e</sup>	25.85±0.010 <sup>b</sup>	87.56±0.001 <sup>c</sup>	43.63±0.005 <sup>c</sup>
	4	40.03±0.015 <sup>c</sup>	41.54±0.001 <sup>b</sup>	218.96±0.020 <sup>a</sup>	175.56±0.020 <sup>a</sup>
	6	45.52±0.020 <sup>a</sup>	39.16±0.001 <sup>c</sup>	210.85±0.015 <sup>c</sup>	166.72±0.015 <sup>d</sup>
	8	39.77±0.010 <sup>e</sup>	38.82±0.002 <sup>d</sup>	207.30±0.021 <sup>d</sup>	163.71±0.021 <sup>e</sup>
	10	40.02±0.020 <sup>d</sup>	41.54±0.002 <sup>b</sup>	218.96±0.020 <sup>a</sup>	175.55±0.020 <sup>b</sup>
大豆分离蛋白	2	44.20±0.015 <sup>b</sup>	44.06±0.001 <sup>a</sup>	215.16±0.010 <sup>b</sup>	171.88±0.010 <sup>c</sup>
	4	40.36±0.017 <sup>b</sup>	35.77±0.021 <sup>c</sup>	204.41±0.015 <sup>c</sup>	160.35±0.015 <sup>c</sup>
	6	37.54±0.015 <sup>e</sup>	37.16±0.025 <sup>c</sup>	206.60±0.020 <sup>d</sup>	163.02±0.015 <sup>d</sup>
	8	39.96±0.015 <sup>c</sup>	36.82±0.025 <sup>d</sup>	208.11±0.021 <sup>c</sup>	164.19±0.016 <sup>c</sup>
	10	39.06±0.025 <sup>d</sup>	41.35±0.010 <sup>b</sup>	228.30±0.020 <sup>b</sup>	184.80±0.020 <sup>b</sup>
羧甲基纤维素钠	0.6	42.23±0.020 <sup>a</sup>	52.05±0.010 <sup>a</sup>	230.18±0.021 <sup>a</sup>	188.27±0.020 <sup>a</sup>
	0.8	55.22±0.020 <sup>c</sup>	36.33±0.025 <sup>e</sup>	259.17±0.015 <sup>a</sup>	213.81±0.015 <sup>b</sup>
	1.0	62.39±0.025 <sup>a</sup>	46.83±0.015 <sup>c</sup>	254.36±0.058 <sup>d</sup>	210.48±0.055 <sup>d</sup>
	1.2	56.89±0.035 <sup>b</sup>	46.75±0.015 <sup>d</sup>	252.67±0.010 <sup>c</sup>	208.75±0.012 <sup>c</sup>
	1.4	46.96±0.015 <sup>e</sup>	52.80±0.020 <sup>a</sup>	254.67±0.020 <sup>c</sup>	212.06±0.020 <sup>c</sup>
	1.4	54.94±0.020 <sup>d</sup>	50.71±0.015 <sup>b</sup>	257.15±0.015 <sup>b</sup>	213.85±0.017 <sup>a</sup>

† 小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。



2.2.4 溶解时间 由图 4 可知,助干剂组中,随着麦芽糊精和  $\beta$ -环糊精添加量的增大,溶解时间相应减少;随着可溶性淀粉添加量的增大,溶解时间相应增大,说明麦芽糊精和  $\beta$ -环糊精可以提高蜂蜜粉的溶解速率。与大豆分离蛋白相比,蛋清粉可以缩短蜂蜜粉的溶解时间,可能是大

豆分离蛋白经热处理后表现出表面疏水性增大的情况,导致溶解时间逐渐上升<sup>[31]</sup>。羧甲基纤维素钠的溶解时间呈先下降后上升趋势,添加量为 1% 时的溶解时间最少。从溶解时间角度出发,选择麦芽糊精、蛋清粉和羧甲基纤维素钠进行后续试验。

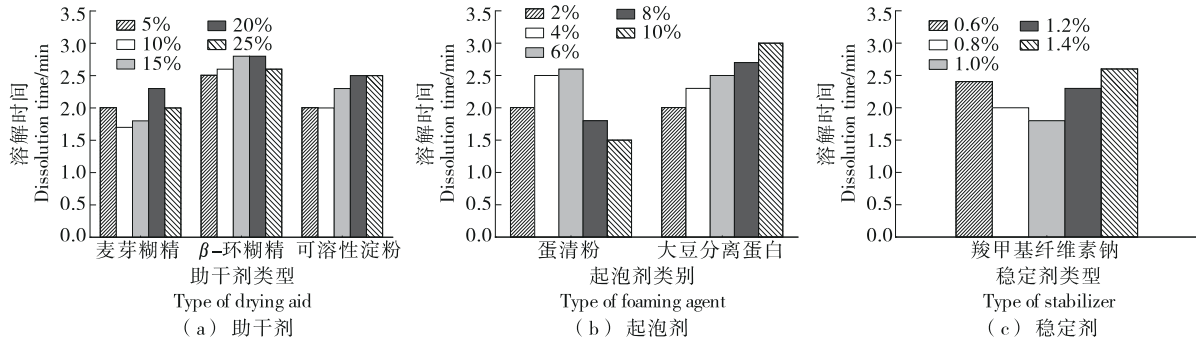


图 4 加工助剂对蜂蜜粉溶解时间的影响

Figure 4 Effect of processing aids on dissolution time of honey powder

2.2.5 感官评分 由图 5 可知,添加 10% 麦芽糊精的蜂蜜粉感官评分为 92 分,其香气、色泽、滋味、形态以及溶解性最好;添加 6% 蛋清粉的蜂蜜粉感官评分为 90 分,添加 1%

羧甲基纤维素钠的蜂蜜粉感官评分为 86 分。从感官评分角度出发,选择麦芽糊精、蛋清粉和羧甲基纤维素钠作为后续蜂蜜粉新产品的开发辅料。

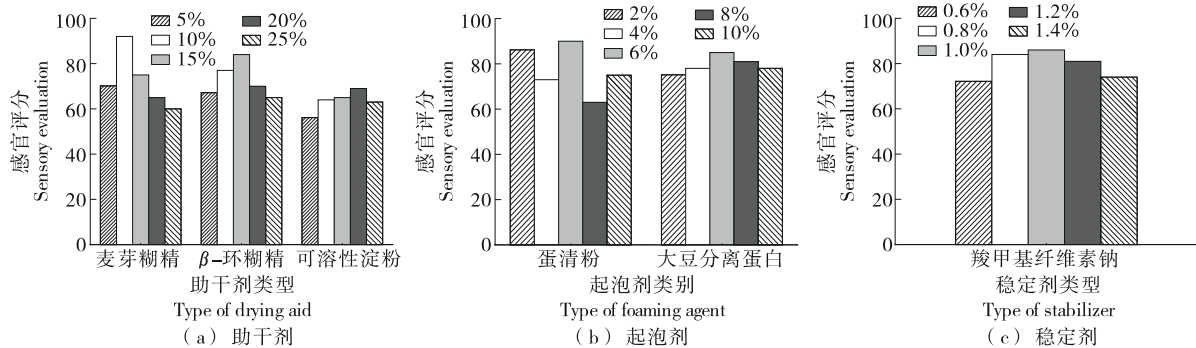


图 5 加工助剂对蜂蜜粉感官评价的影响

Figure 5 Effect of processing aids on sensory evaluation of honey powder

2.3 响应面优化试验

根据单因素试验结果,选择蛋清粉、麦芽糊精及羧甲基纤维素钠添加量为因素,以蜂蜜粉的泡沫膨胀性、稳定性及感官评分为指标,进行三因素三水平响应面优化试验。试验因素水平见表 3,试验设计及结果见表 4。

由表 4 可知,泡沫膨胀性和泡沫稳定性最大时,感官评分最大,泡沫稳定性在 180 min 内保持在 90% 以上,说明该起泡条件下得到的蜂蜜泡沫溶液稳定性较高,适宜下一步的微波干燥。

2.3.1 回归方程的建立及方差分析 对试验数据进行回归分析,得到分别以泡沫膨胀性( $Y_1$ )、泡沫稳定性( $Y_2$ )和感官评分( $Y_3$ )为响应函数;以蛋清粉、麦芽糊精及羧甲基

表 3 响应面试验设计因素与水平

Table 3 Factors and levels of response surface experiment design

水平	X <sub>1</sub> 蛋清粉 添加量/%	X <sub>2</sub> 麦芽糊精 添加量/%	X <sub>3</sub> 羧甲基纤维素钠 添加量/%
-1	2	5	0.8
0	4	10	1.0
1	6	15	1.2

纤维素钠添加量为自变量的数学回归模型,回归方程误差分析见表 5。由表 5 可知, $R^2_{Adj} > R^2_{pred}$ ,二者差值均在 0.2 以内,即回归模型能充分说明干燥过程;CV 值均 < 10%,表明试验的可信度和精确度较高,回归方程的适用性

表4 响应面试验设计及结果  
Table 4 Response surface test results

试验号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	泡沫膨胀性/%	泡沫稳定性/%	感官评分
1	0	1	1	82	86	78.26
2	1	0	-1	78	85	83.05
3	1	-1	0	73	84	75.04
4	1	0	1	77	87	79.15
5	0	0	0	85	92	92.15
6	0	1	-1	78	87	80.04
7	0	-1	1	73	84	73.17
8	0	0	0	85	92	91.63
9	0	0	0	85	93	91.03
10	-1	1	0	75	85	78.15
11	0	-1	-1	74	85	77.18
12	1	1	0	78	86	86.15
13	0	0	0	84	92	92.11
14	-1	0	-1	71	87	75.15
15	-1	0	1	73	83	74.73
16	-1	-1	0	66	84	73.47
17	0	0	0	84	93	92.03

较好。

由表6可知,以泡沫膨胀性为响应值的模型极显著( $P<0.0001$ ),失拟项 $P=0.8395>0.05$ 不显著,说明该模型与试验结果拟合度较好。一次项 $X_1$ 、 $X_2$ 和二次项 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 影响为极显著( $P<0.0001$ ),交互项 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 为极显著( $P<0.01$ ),一次项 $X_3$ 为显著( $P<0.05$ )。通过 $F$ 值可知,各因素对泡沫膨胀性影响大小依次为麦芽糊精>蛋清粉>羧甲基纤维素钠,回归决定系数 $R^2=0.9963$ ,修正决定系数 $R_{Adj}^2=0.9961$ ,说明该模型的拟合度较好。

表5 回归方程误差统计分析

Table 5 Statistical analysis of regression equation errors

统计项目	泡沫膨胀性	泡沫稳定性	感官评分
标准差	0.5278	0.4551	1.2000
平均值	77.7100	87.3500	81.8700
CV/%	0.6792	0.5210	1.4700
$R^2$	0.9963	0.9928	0.9884
$R_{Adj}^2$	0.9961	0.9836	0.9735
$R_{pred}^2$	0.9737	0.9709	0.8678
平均精确度	45.9483	26.5707	20.5871

表6 响应指标方差分析

Table 6 Response index variance analysis

来源	泡沫膨胀性		泡沫稳定性		感官评分	
	$F$ 值	$P$ 值	$F$ 值	$P$ 值	$F$ 值	$P$ 值
模型	209.63	<0.0001	107.51	<0.0001	66.34	<0.0001
$X_1$	197.88	<0.0001	5.43	0.0526	49.46	0.0002
$X_2$	327.12	<0.0001	29.57	0.0010	58.63	0.0001
$X_3$	7.18	0.0316	9.66	0.0171	16.65	0.0047
$X_1X_2$	14.36	0.0068	1.21	0.3083	7.17	0.0317
$X_1X_3$	8.08	0.0550	43.45	0.0003	0.38	0.5573
$X_2X_3$	22.44	0.0021	0.00	1.0000	0.04	0.8473
$X_1^2$	698.90	<0.0001	297.39	<0.0001	134.92	<0.0001
$X_2^2$	348.24	<0.0001	297.39	<0.0001	126.72	<0.0001
$X_3^2$	140.60	<0.0001	192.20	<0.0001	154.33	<0.0001
失拟项	0.83	0.5413	0.28	0.8395	2.86	0.1683

以泡沫稳定性为响应值的模型极显著( $P<0.0001$ ),失拟项 $P=0.8395>0.05$ 不显著,说明该模型与试验结果拟合度较好。一次项 $X_2$ 和二次项 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 影响为极显著( $P<0.0001$ ),交互项 $X_1X_3$ 为极显著( $P<0.01$ ),一次项 $X_3$ 为显著( $P<0.05$ )。通过 $F$ 值可知,各因素对泡沫稳定性影响大小依次为麦芽糊精>羧甲基纤维素钠>蛋清粉。回归决定系数 $R^2=0.9928$ ,修正决定系数 $R_{Adj}^2=0.9836$ ,说明该模型的拟合度较好。

以感官评分为响应值的模型极显著( $P<0.0001$ ),失拟项 $P=0.1683>0.05$ 不显著,说明该模型与试验结果拟合度较好。一次项 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和二次项 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 影响为极显著( $P<0.0001$ ),交互项 $X_1X_2$ 为显著( $P<0.05$ )。通过 $F$ 值可知,各因素对感官评分影响大小依次为麦芽糊精>蛋清粉>羧甲基纤维素钠。回归决定系数 $R^2=0.9884$ ,修正决定系数 $R_{Adj}^2=0.9735$ ,说明该模型的拟合度较好。

去除不显著项后的回归方程为:

$$Y_1=84.60+2.63X_1+3.38X_2+0.50X_3-1.00X_1X_2+1.25X_2X_3-6.80X_1^2-4.80X_2^2-3.05X_3^2, \quad (6)$$

$$Y_2=92.40+0.875X_2-0.50X_3+1.50X_1X_3-3.83X_1^2-3.83X_2^2-3.07X_3^2, \quad (7)$$

$$Y_3=91.59+2.99X_1+3.25X_2-1.73X_3-0.37X_1X_2-6.80X_1^2-6.59X_2^2-7.27X_3^2. \quad (8)$$

2.3.2 响应面优化及工艺参数验证 由图6~图8可知,各因素交互作用对泡沫膨胀性、泡沫稳定性及感官评分影响显著。利用Design-Expert 10软件预测得到的最优条件为蛋清粉添加量6.1%,麦芽糊精添加量10.8%,羧甲基

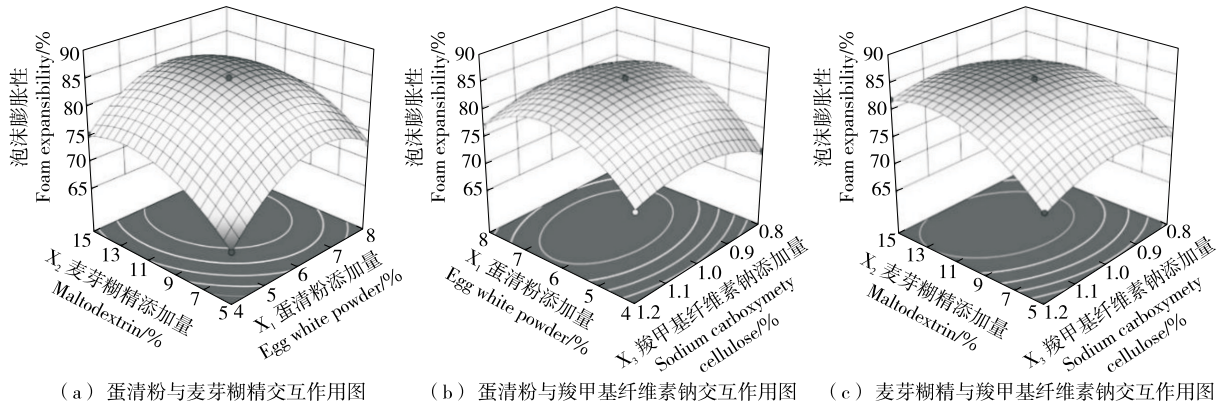


图 6 各因素交互作用对泡沫膨胀性的影响

Figure 6 Interaction effect of various factors on foam expansion

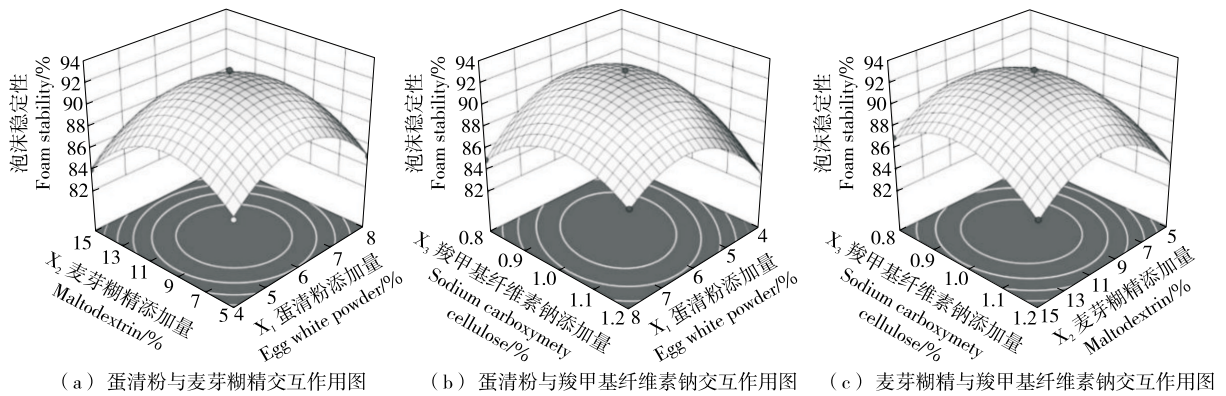


图 7 各因素交互作用对泡沫稳定性的影响

Figure 7 Interaction effect of various factors on foam stability

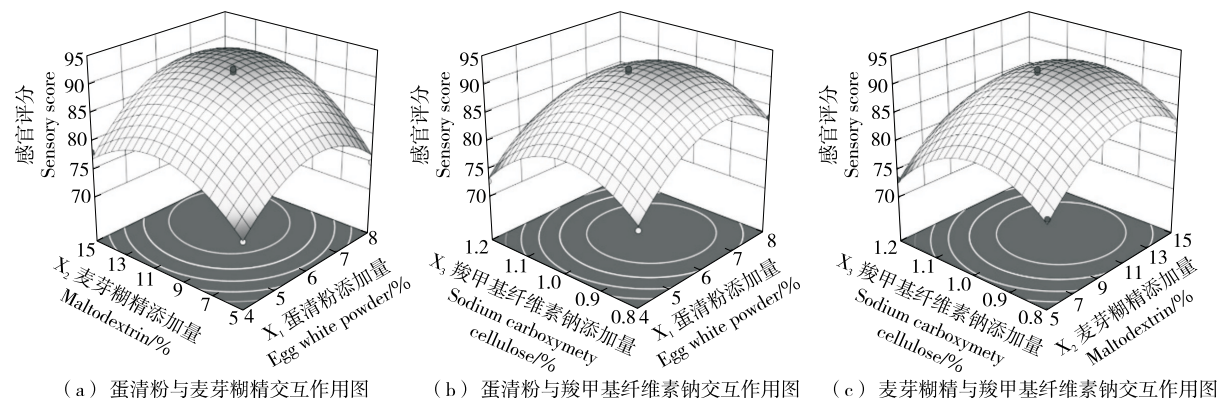


图 8 各因素交互作用对感官评分的影响

Figure 8 Interaction effect of various factors on sensory score

纤维素钠添加量 1%，此条件下预测的泡沫膨胀性为 85%，泡沫稳定性为 92.47%，感官评分为 92.15 分。经 3 次验证实验，测得蜂蜜粉的泡沫膨胀性为 84%，泡沫稳定性为 92.00%，感官评分为 90.56 分，与预测值接近，说明可用该回归模型表征干燥过程。

### 3 结论

建立了微波辅助泡沫干燥蜂蜜的数学回归模型，考察了加工助剂对干燥蜂蜜粉品质的影响。结果表明，蛋清粉可提高整体泡沫的膨胀值，加入麦芽糊精及羧甲基纤维素钠可提高泡沫的稳定性、干燥品质及粉末流动性



等,使最终产品的感官评分达到最高。微波辅助泡沫干燥蜂蜜最优工艺条件为蛋清粉添加量6.1%,麦芽糊精添加量10.8%,羧甲基纤维素钠添加量1%,此时蜂蜜粉的泡沫膨胀性为84%,泡沫稳定性为92%,感官评分为90.56分,与预测值接近,证明该模型可靠。后续可进一步研究干燥条件对蜂蜜粉干燥特性与品质的影响以及蜂蜜粉的贮存稳定性。

### 参考文献

- [1] 冀乐, 祁珊珊, 郑红星, 等. 蜂蜜营养成分及其功能活性研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2024, 60(2): 101-107.  
JI L, QI S S, ZHENG H X, et al. Research progress on nutritional composition and functional activity of honey[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2024, 60(2): 101-107.
- [2] 彭苑哲, 任智先, 杨华, 等. 蜂蜜在古今中药制剂中的应用概况[J]. 中成药, 2024, 46(5): 1 565-1 569.  
PENG Y Z, REN Z X, YANG H, et al. Application of honey in ancient and modern Chinese medicine preparations[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(5): 1 565-1 569.
- [3] 李园园, 杨文超, 叶丹榕, 等. 蜂蜜粉的加工工艺[J]. 蜜蜂杂志, 2021, 41(2): 9-13.  
LI Y Y, YANG W C, YE D R, et al. Study on processing technology of honey powder[J]. Journal of Bee, 2021, 41(2): 9-13.
- [4] SAMBORSKA K, SOKOŁOWSKA P, SZULC K. Diafiltration and agglomeration as methods to improve the properties of honey powder obtained by spray drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 33-41.
- [5] APICELLA M, AMATO G, DE BARTOLOMEIS P, et al. Natural food resource valorization by microwave technology: purslane stabilization by dielectric heating[J]. Foods, 2023, 12(23): 4 247.
- [6] 郑先哲, 张雨涵, 刘成海, 等. 微波技术在食品和农产品加工中应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 14-28.  
ZHENG X Z, ZHANG Y H, LIU C H, et al. Research progress in the microwave technologies for foodstuffs and agricultural products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 14-28.
- [7] ZAHOOR I, AHMAD MIR T, AYOUB W S, et al. Recent applications of microwave technology as novel drying of food: review[J]. Food and Humanity, 2023, 1: 92-103.
- [8] THUWAPANICHAYANAN R, PRACHAYAWARAKORN S, SOPONRONNARIT S. Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 47(2): 348-357.
- [9] AZIZPOUR M, MOHEBBI M, KHODAPARAST M H H. Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 122-126.
- [10] 林甄, 隋良志, 郑先哲, 等. 微波泡沫干燥对树莓果粉介电特性的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 10-14, 309.  
LIN Z, SUI L Z, ZHENG X Z, et al. Effect of microwave-assisted foam drying conditions on the dielectric properties of raspberry fruit powder[J]. Food & Machinery, 2014, 30(5): 10-14, 309.
- [11] 王骋, 窦鸿瑄. 微波技术在食品加工中的应用[J]. 食品安全导刊, 2022(13): 168-170.  
WANG C, DOU H X. Application of microwave technology in food processing[J]. China Food Safety Magazine, 2022(13): 168-170.
- [12] 秦庆雨, 郑先哲, 王磊, 等. 树莓果浆微波泡沫干燥过程能量吸收与利用[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 124-133.  
QIN Q Y, ZHENG X Z, WANG L, et al. Energy absorption and utilization during microwave foam drying of raspberry pulp[J]. Food Science, 2020, 41(15): 124-133.
- [13] AFFANDI N, ZZAMAN W, YANG T, et al. Production of nigella sativa beverage powder under foam mat drying using egg albumen as a foaming agent[J]. Beverages, 2017, 3(1): 9.
- [14] DJAENI M, PRASETYANINGRUM A, SASONGKO S B, et al. Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(2): 1 170-1 175.
- [15] YÜKSEL A N. Development of yoghurt powder using microwave-assisted foam-mat drying[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(7): 2 834-2 841.
- [16] GAO R L, XUE L L, ZHANG Y H, et al. Production of blueberry pulp powder by microwave-assisted foam-mat drying: effects of formulations of foaming agents on drying characteristics and physicochemical properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112811.
- [17] ISLAM M Z, JAHAN M I, MONALISA K, et al. Impact of maltodextrin, egg white protein addition and microwave-assisted foam mat drying on drying kinetics, microstructures, physicochemical and quality attributes of jackfruit juice powder[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 200: 116158.
- [18] OMIDI S, AARABI A, ZAKI DIZAJI H, et al. Microwave-assisted foam mat drying of red beet pulp: influence of milk protein concentrate (MPC) and maltodextrin as a foaming agent, optimization and quality attribute[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(4): 2 505-2 525.
- [19] 应欣, 卢玉, 李义, 等. 麦芽糊精的功能特性及其应用研究进

- 展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(12): 131-137.
- YING X, LU Y, LI Y, et al. Research advance in maltodextrins functionality and application[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(12): 131-137.
- [20] PATIL B N, GUPTA S V, PATIL N B, et al. Influence of microwave drying on quality parameters of foamed Nagpur Mandarin (*Citrus reticulata*) juice[J]. Heliyon, 2024, 10(9): e30449.
- [21] 武一涵, 赵保堂, 丁玉, 等. 羧甲基纤维素的添加对蛋清蛋白功能特性的协同效应的影响[J]. 食品与发酵科技, 2024, 60(2): 14-19.
- WU Y H, ZHAO B T, DING Y, et al. Effect of the addition of carboxymethyl cellulose on the synergistic effect of the functional properties of egg white proteins[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2024, 60(2): 14-19.
- [22] 宋瑞霞. 蜂蜜粉加工工艺的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 32-39.
- SONG R X. Study on the process of the honey powder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004:32-39.
- [23] 邹婕, 王琪, 马美湖, 等. 高场强超声对蛋清液起泡特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 163-171.
- ZOU J, WANG Q, MA M H, et al. Effects of high intensity ultrasound on foaming characteristics of egg white liquid[J]. Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 163-171.
- [24] 郑先哲, 刘成海, 周贺. 黑加仑果浆微波辅助泡沫干燥特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 288-293.
- ZHENG X Z, LIU C H, ZHOU H. Drying characteristics of blackcurrant pulp by microwave-assisted foam mat drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 288-293.
- [25] 李兴霞, 李越, 杨菲菲, 等. 吸湿性对冻干果蔬产品及其品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- LI X X, LI Y, YANG F F, et al. The effect of hygroscopicity on quality characteristics of different freeze-drying fruit and vegetable products[J]. Food & Machinery, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- [26] 吴绍锋, 强华, 张欣, 等. 基于遗传算法的南瓜联合干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 183-191, 240.
- WU S F, QIANG H, ZHANG X, et al. Process parameter optimization of pumpkin combined drying based on genetic algorithm[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 183-191, 240.
- [27] 于婷, 鞠璐宁, 吴珍红. 蜂蜜木瓜粉喷雾干燥配方的研究[J]. 中国蜂业, 2011, 62(S1): 35-37.
- YU T, JU L N, WU Z H. Study on the spray drying recipe of honey-papaya powder[J]. Apiculture of China, 2011, 62(S1): 35-37.
- [28] DE CÔL C D, TISCHER B, HICKMANN FLÔRES S, et al. Foam-mat drying of bacaba (*Oenocarpus bacaba*): process characterization, physicochemical properties, and antioxidant activity[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 126: 23-31.
- [29] SHEN L Y, GAO M, ZHU Y, et al. Microwave drying of germinated brown rice: correlation of drying characteristics with the final quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 70: 102673.
- [30] 高瑞丽. 微波泡沫干燥蓝莓果粉的特性、品质及应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023: 23-32.
- GAO R L. Study on the characteristics, quality and application of blueberry powder under microwave-assisted foam-mat drying[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023: 23-32.
- [31] HU X Z, CHENG Y Q, FAN J F, et al. Effects of drying method on physicochemical and functional properties of soy protein isolates[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(3): 520-540.