

平菇微波-真空冷冻联合干燥工艺优化及其品质分析

朱彩平, 孙静儒, 孙红霞, 陈欣冉, 李倩楠

(陕西师范大学食品工程与营养科学学院, 中俄食品与健康科学国际联合研究中心, 陕西西安 710119)

摘要: 为得到平菇最优干燥工艺, 提高其干燥制品品质, 本试验利用设计专家(Design-expert)软件的Box-Behnken design(BBD)方法设计, 分别采用单因素和响应面试验方法, 分析探讨微波功率、转换点含水率和真空冷冻干燥时间三个因素对产品干基含水率、干燥速率、复水比和感官得分的影响。根据试验数据得出4个指标的二次回归模型, 并对其进行响应面分析, 得出优化后的平菇干燥工艺, 最后对最优工艺条件下的平菇干制品营养成分(蛋白质、粗脂肪和总糖含量)进行测定。平菇最佳微波-真空冷冻联合干燥工艺为: 微波功率 300 W、转换点含水率 37%、真空冷冻干燥时间 11 h, 在该条件下得到的平菇干制品具有色泽良好、品质极佳、营养成分保留较高等优点, 以上工艺条件可为平菇干制品的工业化生产提供一定的理论依据和指导。

关键词: 平菇; 干燥; 响应面设计

文章编号: 1673-9078(2019)06-129-138

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.017

Optimization of the Combined Microwave-vacuum Freezing Drying Process and Quality Analysis of *Pleurotus ostreatus*

ZHU Cai-ping, SUN Jing-ru, SUN Hong-xia, CHEN Xin-ran, LI Qian-nan

(College of Food Engineering and Nutritional Science, International Joint Research Center of Shaanxi Province for Food and Health Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: This paper aims to obtain the optimal drying process of *Pleurotus ostreatus* as well as to improve the quality of its drying products. Based on the methods of single factor and response surface method with the Box-Behnken design (BBD), an experiment was conducted to analyze the effect of three factors including the microwave power, moisture content of switching point and vacuum freezing time on the 4 indicators of dry basis moisture content, drying rate, rehydration ratio and sensory score of the product correspondingly. The quadratic regression models of the 4 indicators were constructed and analyzed with the response surface method according to the experimental data, and the optimal drying process of *Pleurotus ostreatus* was obtained, which was microwave power 300 W, conversion point moisture content 37%, vacuum freezing time 11 h. In addition, the nutrients of the dried *Pleurotus ostreatus* (protein, crude fat and total sugar content) were measured under the optimal process conditions. From the experiment and data analysis, it can be concluded that under the proposed optimal processing, the dried *Pleurotus ostreatus* products have the advantages of good color, excellent quality and high retention of nutrients, which can guide the mass-production of dried *Pleurotus ostreatus* under industrial conditions.

Key words: *Pleurotus ostreatus*; drying; response surface design

平菇 (*Pleurotus ostreatus*) 原名侧耳, 别名北风菌、糙皮侧耳、白平菇、美味侧耳、凤尾菇等, 属担子菌门下伞菌目侧耳科, 是目前我国栽培最多的四大食用菌菇(平菇、香菇、蘑菇、草菇)之一^[1]。

平菇性味甘、温, 富含蛋白质、多糖、氨基酸和多种矿物质, 不仅具备追风散寒, 舒筋活络、改善人

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301598); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201803086); 陕西师范大学大学生勤助科研项目(KY2018ZD006)

作者简介: 朱彩平(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农副产品加工及利用

体新陈代谢等功效^[2], 还对减少人体血清胆固醇、降低血压和防治肝炎、胃溃疡、十二指肠溃疡等有明显的效果。另外, 有研究表明, 常食平菇对预防癌症、调节妇女更年期综合症、增强人体免疫力等^[3]有一定作用, 具有很高的食疗价值。但因为平菇中含水量达到 90%左右^[4], 组织细嫩, 菌体表面没有明显的保护结构, 因此易腐烂、储藏时间短^[5], 常温下自然保鲜不超过 2 d, 货架寿命很短^[6]。为了提高其储存期, 降低运输成本, 有必要对其进行脱水干燥。

近年来, 联合干燥作为一种有效的干燥方式, 已经广泛地应用到香菇、杏鲍菇、胡萝卜等果蔬脱水干燥领域中^[7]。干燥后的果蔬制品存放时间久, 能够有

效地延长其储存及货架期。微波干燥^[8]和真空冷冻干燥^[9]是常用的果蔬干燥法,已经广泛应用到果蔬的干燥中。微波干燥速度快、反应灵敏、易操作^[10];真空冷冻干燥通过对鲜物料预先冻结,随后将物料的水分从固态直接升华为气态实现干燥,故能较好的保持食品原来的结构,从而最大限度地保留食品的原始颜色和营养成分^[11]。目前,科研工作者对平菇的研究主要是集中在其生长培育及多糖成分提取方面,对平菇干燥的研究极少且仅限在单一干燥方面,孙亚男等^[12]利用真空冷冻干燥技术研究平菇的冻干预处理工艺;芦菲等^[13]利用喷雾干燥技术研究平菇精粉制备工艺,但对平菇的联合干燥尚未见报道。因此,本研究在平菇新鲜的状态下,用微波-真空冷冻联合的方式对其进行干燥,并对其感官品质及营养成分进行测定,旨在为有效延长平菇储藏时间,提高储藏品质,开发平菇干制品提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

新鲜平菇(浅灰色品种)购于陕西省西安市长安区农贸市场,要求新鲜无喷水、无菌斑及损坏。将其中一部分平菇用保鲜膜包裹,放入4℃的冰箱中进行冷藏保存,作为鲜制品对照。

1.2 主要仪器

GZX-9146 MBE 数显鼓风干燥箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;BS-224-S 电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;LGJ-10 真空冷冻干燥机,巩义市予华仪器有限责任公司;WD700 微波炉,乐金电子(天津)电器有限公司;Kjeltec 2003 全自动凯氏定氮仪,瑞典福斯公司;DFT-50A 手提式高速万能粉碎机,温岭市林大机械有限公司;IU1810 紫外可见分光光度计,北京普析通用。

1.3 试验方法

1.3.1 平菇微波-真空冷冻干燥工艺流程

新鲜平菇→切片(宽度2cm)→杀青(沸水3min)→快速沥干(15min)→微波干燥(加热2min、间歇2min)→预冻(-20℃,3h)→真空冷冻干燥(冷阱温度-60℃,真空度8.2Pa,auto模式自动解析和干燥,干基含水率至10%以下^[14])→指标测定

1.3.2 单因素试验设计

新鲜平菇切片成2cm左右宽度,装载量为50.00g,真空冷冻干燥仪器真空度8.2Pa,真空冷冻干燥温

度由真空冷冻干燥仪器自动调节^[15]。

转换点含水率为35%,真空冷冻干燥时间为10h,设置微波功率分别为140W、280W、420W,考察其对平菇联合干燥产品品质的影响;微波功率为280W,真空冷冻干燥时间为10h,设置转换点含水率为25%、35%、45%,考察其对平菇联合干燥产品品质的影响;微波功率280W、转换点含水率35%,设置真空冷冻干燥时间为5h、10h、15h,考察其对平菇联合干燥产品品质的影响。

1.4 能耗对比

分别称取两份预处理后的平菇50.00g,一份平铺在托盘上进行微波干燥(280W功率、加热2min、间歇2min);另一份平铺在托盘上预冻3h后,放入真空冷冻干燥器中(真空度8.2Pa、温度自动调节)进行真空冷冻干燥。分别计算两种单一干燥方式单位能耗,然后与联合干燥的单位能耗进行对比。

1.5 工艺优化

在单因素的基础上,选取微波功率、转换点含水率、真空冷冻干燥时间为主要影响因素,最终以干基含水率、干燥速率、复水比和感官得分为响应值,采用BBD方法进行工艺优化^[16]。

1.6 测定方法

1.6.1 干基含水率

含水量的测定按照国家标准GB5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[17]执行,干基含水率根据式(1)计算。

$$M_t = (W_t - G) / G \quad (1)$$

式中: M_t : 物料干至 t 时刻干基含水率, g/g; W_t : 干至 t 时刻物料的总质量, g; G : 干物质质量, g。

1.6.2 干燥速率

本联合干燥试验各个阶段均采用平均速率,根据式(2)计算^[18]。

$$DR = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中: DR : 物料干燥速率, g/(g·min); M_{t_1} : t_1 时刻物料干基含水量, g/g; M_{t_2} : t_2 时刻物料干基含水量, g/g。

1.6.3 复水比测定

称取干燥后的平菇干制品5.00g,在常温自来水条件下复水,复水时间5min,取出后沥干5min,并用吸水纸吸干平菇表面水分,称重。每组试验3次作为平行,结果取平均值。复水比根据式(3)计算^[19]。

$$R = M_2 / M_1 \quad (3)$$

式中: R : 复水比; M_1 , M_2 : 平菇复水前、后质量。

1.6.4 感官得分

根据 GB 8859-1988 标准, 从平菇的外观、色泽、质地、风味 4 个方面来评价干燥后平菇的感官质量。感官得分见表 1^[20]。

表 1 平菇干燥品感官评价表

Table 1 Sensory evaluation form of dried *Pleurotus ostreatus*

评价指标	标准	评分
外观	形状完好、边缘无卷曲	8~10
	菇片稍有皱缩、卷曲较少	4~7
	菇片皱缩严重、卷曲较多	0~3
色泽	浅灰色稍发白、基本无褐色	8~10
	浅灰色发黄、基本无褐色	4~7
	深灰色发黄、出现些许褐色	0~3
质地	坚硬脆片、不酥脆	8~10
	较酥脆、稍易断	4~7
	非常酥脆、易断状	0~3
风味	菇鲜味浓郁, 易被接受	8~10
	菇鲜味较淡, 可以接受	4~7
	菇腥味较重, 难以接受	0~3

1.6.5 单位能耗计算

每蒸发平菇一个单位质量水分所耗电能, 以电机额定输入功率及每组试验总加热时间计算干燥过程中的单位能耗 W, 计算公式根据式 (4)^[21]。

$$W = \frac{P \times T}{G} \quad (4)$$

式中: W: 单位消耗电工, kJ/g; P: 电机额定输入功率, kW; T: 总干燥时间, h; G: 去除水分的重量, g。

1.6.6 蛋白质含量

蛋白质含量依据 GB/T 15673-2009《食品安全国家标准 食用菌中粗蛋白含量的测定》^[22]方法进行粗蛋白提取。

1.6.7 粗脂肪含量

脂肪含量测定依据 GB/T 15674-2009《食品安全国家标准 食用菌中粗脂肪含量的测定》^[23]方法进行测定。

1.6.8 总糖含量

总糖含量依据 GB/T 15672-2009《食品安全国家标准 食用菌中总糖含量的测定》^[24]方法进行测定。

1.7 数据处理方法

每次试验均重复三次, 并采用 Origin Pro9.1、Design-Expert 8.0.6 分别对单因素试验结果和响应面试验结果进行分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 微波-真空冷冻干燥对平菇干基含水率和干燥速率的影响

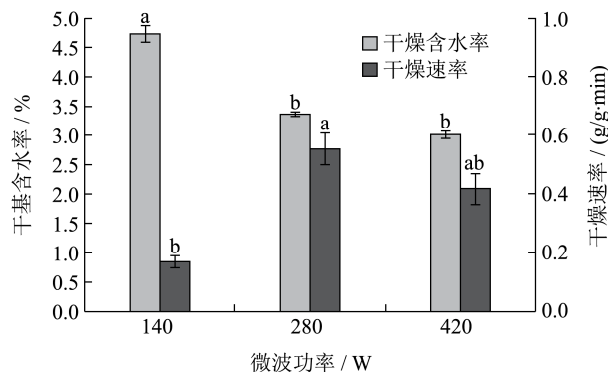


图 1 微波功率对干基含水率和干燥速率的影响

Fig.1 Effect of microwave power on dry water content and drying rate

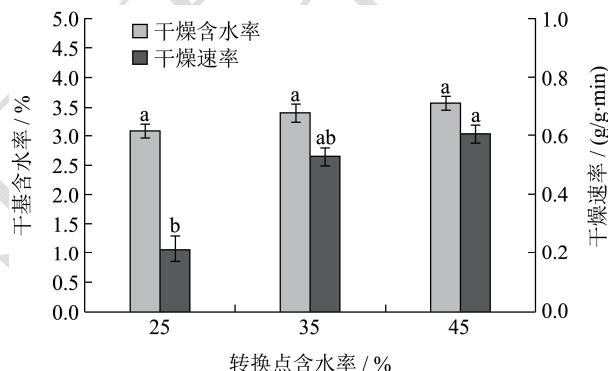


图 2 转换点含水率对干基含水率和干燥速率的影响

Fig.2 Effect of moisture content at the transition point on dry water content and drying rate

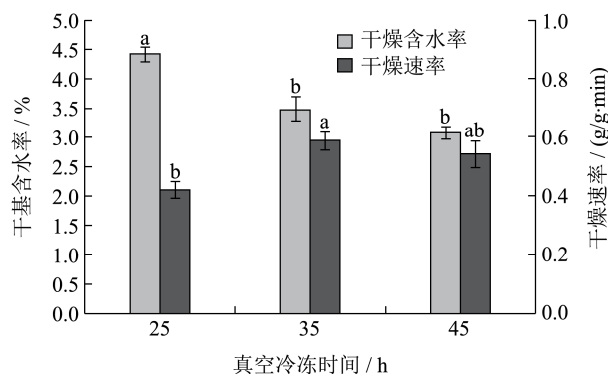


图 3 真空冷冻干燥时间对干基含水率和干燥速率的影响

Fig.3 Effect of freeze-drying time on dry water content and drying rate

由图 1~3 可知, 平菇干基含水率和干燥速率的变化与微波干燥功率、转换点含水率和真空冷冻干燥时间密切相关。由图 1 可以看出, 在转换点含水率和真空冷冻时间相同的情况下, 平菇干基含水率随微波功率的增大而降低。微波功率为 140 W 时, 平菇干燥速

率只有 0.17 g/(g·min)，当微波功率增加到 280 W 时，平菇的干燥速率上升至 0.55 g/(g·min)，比之前增加了 2 倍有余。因平菇中含糖量较高^[2]，在干燥时属于内部扩散控制类型，而将微波功率增加到 420 W 时，容易造成平菇中外部水分迅速蒸发，内部水分还在的情况，从而导致平菇表面硬壳的形成，因此其干燥速率又有所下降。在其它干燥条件不变的前提下，当微波功率增大到一定程度后，平菇中的水分流失较快，干燥速率达到最高值 0.55 g/(g·min) 后逐渐开始下降，这与顾思忠等^[25]研究的胡萝卜在不同微波功率条件下干燥初期水分流失最快，而后趋于稳定结果一致。通过显著性分析可知，140 W 微波功率下的平菇干基含水率要显著大于 280 W 和 420 W 条件下 ($p < 0.05$)；280 W 和 420 W 条件下平菇干基含水率不存在显著差异 ($p > 0.05$)；280 W 条件下平菇干燥速率显著大于 140 W 条件下 ($p < 0.05$)。

在微波功率和真空冷冻干燥时间相同的条件下，平菇的干基含水率和干燥速率与其微波-真空冷冻联合干燥的转换点含水率密切相关。由图 2 可以看出，随着联合干燥转换点含水率的增加，平菇干基含水率和干燥速率均为增大趋势。转换点含水率越大，表明经过微波干燥后平菇中剩余水分含量越多，当其由 25% 增加到 45% 时，平菇干燥速率由 0.21 g/(g·min) 上升到 0.61 g/(g·min)，增加了 3 倍左右，但其干基含水率基本趋于稳定。这是因为在干燥时间相同的条件下，过高的转换点含水率使得平菇在干燥后仍有一小部分水没有被去除，这种情况不利于平菇干燥后的储藏。通过显著性分析可知，不同转换点含水率条件下，平菇干基含水率之间无显著性差异 ($p > 0.05$)；转换点含水率 35% 和 45% 条件下，平菇干燥速率显著大于 25% 条件下 ($p < 0.05$)。

在微波功率和转换点含水率相同的条件下，当真空冷冻干燥时间由 5 h 增加到 15 h 时，平菇的干燥速率出现先增大后减小的趋势，其中前 10 h 内平菇中自由水含量较高，升华干燥不断进行，干燥速率达到最高值 0.59 g/(g·min)，后 5 h 平菇中自由水含量基本流失，因此干燥速率稍有下降。平菇的干基含水率则随着真空冷冻干燥时间的增大而减小，这与高颖宇等^[26]真空冷冻杏鲍菇得出的结论一致。通过显著性分析可知，真空冷冻时间为 5 h 条件下，平菇干基含水率显著大于 10 h 和 15 h 条件下 ($p < 0.05$)；真空冷冻时间为 10 h 条件下，平菇干燥速率显著高于 5 h 条件下 ($p < 0.05$)。由以上分析可以得出，微波功率、转换点含水率和真空冷冻干燥时间是平菇干燥过程中影响其产品干基含水率和干燥速率的重要因素。

2.1.2 微波-真空冷冻干燥对平菇复水比和感官得分的影响

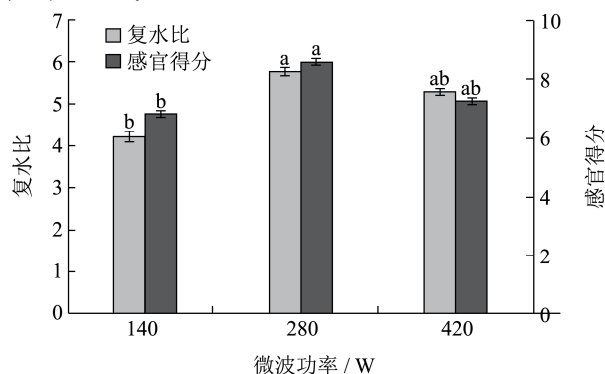


图 4 微波功率对平菇复水比和感官得分的影响

Fig.4 Effect of microwave power on rehydration ratio and sensory score of *Pleurotus ostreatus*

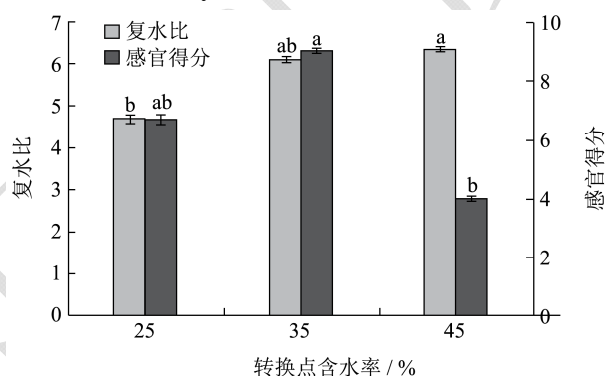


图 5 转换点含水率对平菇复水比和感官得分的影响

Fig.5 Effect of moisture content at the transition point on rehydration ratio and sensory score of *Pleurotus ostreatus*

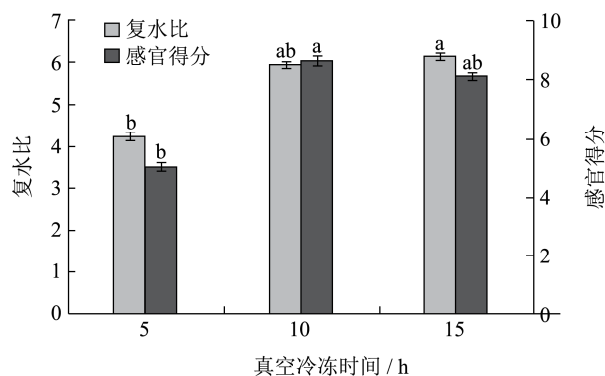


图 6 真空冷冻干燥时间对平菇复水比和感官得分的影响

Fig.6 Effect of freeze-drying time on rehydration ratio and sensory score of *Pleurotus ostreatus*

在不同的干燥条件下，平菇复水比和感官得分的变化如图 4~6 所示。

由图 4 可以看出，随着微波功率的增大，平菇的复水比先增加后降低，当功率从 140 W 增加到 280 W 时，平菇复水比从 4.21 提升到了 5.77，但再增加到 420 W 后复水比反而下降到 3.81。这是因为随着微波功率的提高，平菇表层水分蒸发较快，破坏了细胞壁且形

成表面硬壳,从而影响了其吸水能力,故在 420 W 条件下复水比受到影响略有降低,这与 Krokida 等^[27]人的研究干燥物料复水情况的结论一致。平菇产品的感官得分在 280 W 条件下因色泽和表面卷曲程度均比较好,得分为 8.6 分。通过显著性分析可知,微波功率为 280 W 条件下,平菇的复水比和感官得分均显著高于 140 W 条件下 ($p<0.05$); 280 W 和 420 W 条件下,平菇的复水比和感官得分无显著性差异 ($p>0.05$)。

由图 5 可以看出,在其他干燥条件相同的前提下,随着转换点含水率的升高,平菇的复水比也逐渐增大,在转换点含水率为 45% 时达到最高值 6.33。这是由于平菇在转换点含水率较高的条件下由微波干燥转为真空冷冻干燥,其干燥后的平菇微观结构中孔隙较大吸水性强,从而有了较高的复水比,这一点与孙翠等^[21]人研究杏鲍菇热风-真空冷冻干燥的复水结论一致。感官得分在 35% 含水率时达到最高值 9 分,而后在 45% 含水率时下降为 3.9 分。这是因为转换点含水率过高导致平菇没有干燥彻底,在其表面发黄、褐变等色泽变化,且卷曲较为严重。通过显著性分析可知,转换点含水率为 45% 条件下,平菇复水比显著高于 25% 条件下 ($p<0.05$); 转换点含水率为 35% 条件下,平菇干燥产品感官得分显著高于 45% 条件下 ($p<0.05$)。

从图 6 看出,在其他干燥条件相同的情况下,随着真空冷冻干燥时间增加,平菇的复水比处于上升趋势。真空冷冻干燥时间由 5 h 增至 15 h 时,平菇复水

比由 4.21 上升到 6.11,增加了 1.5 倍左右,由于冷冻干燥的时间越长,平菇中水分残留越少,其干基含水率越低,且冻干后平菇的微观结构较为松散,多孔性结构更有利于复水^[28]。而感官得分处于先增大后减小的趋势,这是因为真空冷冻干燥处于真空条件下,干燥 10 h 左右的平菇品质均较好,基本无发黄褐变情况,得分为 8.6 分,但干燥 15 h 左右平菇质感稍微过于酥脆、易折断,因此感官评分有所下降。通过显著性分析知,真空冷冻时间 15 h 条件下,平菇复水比显著高于 5 h 条件下 ($p<0.05$); 真空冷冻时间为 10 h 条件下,平菇干燥产品感官得分显著高于 5 h 条件下 ($p<0.05$)。

综上所述,微波功率、转换点含水率和真空冷冻干燥时间这三个因素在平菇干燥过程中对干基含水率、干燥速率、复水比、感官得分这四个指标有着显著影响。

2.2 响应面法优化试验设计

表 2 微波-真空冷冻联合干燥平菇试验因素水平表

Table 2 Microwave-vacuum freezing combined with dried *Pleurotus ostreatus* experimental factors level table

水平	A 微波功率/W	B 转换点含水率/%	C 真空冷冻时间/h
-1	140.0	25.0	5.0
0	280.0	35.0	10.0
+1	420.0	45.0	15.0

表 3 平菇微波-真空冷冻联合干燥试验设计结果

Table 3 Design results of microwave-vacuum freezing combined drying experiment of *Pleurotus ostreatus*

序号	A	B	C	Y1 干基含水率	Y2 干燥速率	Y3 复水比	Y4 感官得分
1	0	1	-1	13.43	4.34	6.71	3.9
2	1	-1	0	2.27	0.33	2.89	5.9
3	-1	-1	0	2.36	0.77	2.99	6.8
4	0	0	0	3.32	0.59	6.03	8.7
5	0	0	0	3.49	0.67	5.89	8.6
6	0	0	0	3.44	0.55	5.92	9.0
7	0	-1	1	2.45	0.19	3.69	7.3
8	1	1	0	6.63	0.69	4.19	7.2
9	0	0	0	3.38	0.61	6.08	8.6
10	-1	0	-1	8.14	4.14	5.99	4.6
11	0	1	1	3.21	0.21	3.71	7.0
12	1	0	-1	7.39	4.01	4.86	6.5
13	-1	0	1	2.89	0.47	3.19	7.2
14	1	0	1	3.89	0.29	4.22	6.6
15	-1	1	0	4.28	3.39	4.92	7.3
16	0	-1	-1	7.68	4.49	2.69	7.4
17	0	0	0	3.5	0.61	6.19	8.9

2.2.1 响应面试验设计

在单因素试验的基础上,选取适当的微波功率 A、转换点含水率 B、真空冷冻干燥时间 C,采用 Box-Benhnken 方法设计进行平菇微波-真空冷冻联合干燥的多因素试验。微波功率、转换点含水率、真空冷冻干燥时间的因素水平编码见表 2,试验设计结果见表 3。

采用 Design Expert.8.0.6.1 统计分析软件对平菇微波-真空冷冻干燥干基含水率 (Y1)、干燥速率 (Y2)、复水比 (Y3) 和感官得分 (Y4) 的试验结果进行回归分析,得二次回归方程:

$$Y1=3.43+0.063A+1.6B-3.86C+0.61AB+0.44AC-1.25BC-0.33A^2+0.79B^2+2.48C^2+1.67A^2C+0.5AB^2 \quad (1)$$

$$Y2=0.61-0.077A-0.032B-2.11C-0.57AB-0.013C+0.3A^2+0.38B^2+1.32C^2+0.78A^2B+0.26A^2C-0.71AB^2 \quad (2)$$

$$Y3=6.02+0.47A+1.01B-0.43C-0.16AB+0.04AC-1.0BC-1.2A^2-1.07B^2-0.75C^2-0.2A^2B-0.68AB^2 \quad (3)$$

$$Y4=8.76+0.33A+0.45B+0.71C+0.2AB-0.63AC+0.80BC-1.07A^2-0.89B^2-1.47C^2-0.58AB^2-1.4BC^2 \quad (4)$$

在式 (1)、式 (2)、式 (3) 和式 (4) 中,方程各项系数的大小反应各因素对响应值的影响程度。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Regression model analysis of variance

变异来源	p 值			
	Y1	Y2	Y3	Y4
模型	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***
A	0.1659	0.0356*	0.0011**	0.0121
B	<0.0001***	0.2850	<0.0001***	0.0031**
C	<0.0001***	<0.0001***	0.0003**	0.0001**
AB	<0.0001***	<0.0001***	0.0750	0.0645
AC	<0.0001***	0.6646	0.5937	0.0007**
BC	<0.0001***		<0.0001***	0.0002**
A ²	0.0003**	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***
B ²	<0.0001***	<0.0001***	<0.0001***	0.0001**
C ²	<0.0001***	<0.0001***	0.0001**	<0.0001***
A ² B		<0.0001***	0.0971	
A ² C	<0.0001***	0.0011**		
AB ²	0.0003**	<0.0001***	0.0010**	0.0049**
AC ²				
BC ²				<0.0001***
失拟项	0.3451	0.1215	0.1798	0.5906

注: *表示显著 (p<0.05), **表示较显著 (p<0.01), ***表示极显著 (p<0.001)。

2.2.2 方差分析

由表 4 可知,在干基含水率回归方程 (1) 中,一次项 B、C 极其显著 (p<0.001), A 不显著 (p>0.05); 二次项 A²、B²、C² 均极其显著 (p<0.001); 交互项 AB、AC、BC、A²C、AB² 均极显著。剔除不显著项,得到模型方程: Y1=3.43+1.6B-3.86C+0.61AB+0.44AC-1.25BC-0.33A²+0.79B²+2.48C²+1.67A²C+0.5AB²。模型回归确定系数 R=0.9993>0.8,显示该模型良好。对二次回归方程模型进行检验,结果显示 p<0.001,模型极其显著,表明试验数据的相关性良好;失拟项检验 p>0.05,表明未知因素对试验结果影响较小,方程拟合度较好,模型可以用来进行预测与分析。

在干燥速率回归方程 (2) 中,一次项 A 显著

(p<0.05)、C 极其显著 (p<0.001), B 不显著 (p>0.05); 二次项 A²、B²、C² 极其显著 (p<0.001); 交互项 AB、A²B、AB² 均极显著, A²C 显著。剔除不显著项,得到模型方程: Y2=0.61-0.077A-0.032B-2.11C-0.57AB+0.3A²+0.38B²+1.32C²+0.78A²B+0.26A²C-0.71AB²。模型回归确定系数 R=0.9990>0.8,显示该模型良好。对二次回归方程模型进行检验,结果显示 p<0.001,模型极其显著,表明试验数据的相关性良好;失拟项检验 p>0.05,表明未知因素对试验结果影响较小,方程拟合度较好,模型可以用来进行预测与分析。

在复水比回归方程 (3) 中,一次项 A、B、C 均较显著 (p<0.01); 二次项 A²、B²、C² 均极其显著 (p<0.001); 交互项 AB、AC、A²B 不显著。剔除不

显著项, 得到模型方程: $Y_3=6.02+0.47A+1.01B-0.43C-1.0BC-1.2A^2-1.07B^2-0.75C^2-0.68AB^2$ 。模型回归确定系数 $R=0.9888>0.8$, 显示该模型良好。对二次回归方程模型进行检验, 结果显示 $p<0.001$, 模型极其显著, 表明试验数据的相关性良好; 失拟项检验 $p>0.05$, 表明未知因素对试验结果影响较小, 方程拟合度较好, 该模型可以用来进行预测与分析。

在感官评分回归方程 (4) 中, 一次项 B、C 较显著 ($p<0.01$), A 显著 ($p<0.05$); 二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 均极其显著 ($p<0.01$); 互交项 AC、BC、 AB^2 、 BC^2 均极其显著 ($p<0.001$)。剔除不显著项, 得到模型方程 $Y_4=8.76+0.33A+0.45B+0.71C-0.63AC+0.80BC-1.07A^2-0.89B^2-1.47C^2-0.58AB^2-1.4BC^2$ 。模型回归确认系数 $R=0.9860>0.8$, 显示该模型良好。对二次回归方程模型检验, 结果显示 $p<0.001$, 模型极其显著, 表明试验数据的相关性良好; 失拟项检验 $p>0.05$, 表明方程拟合度较好, 模型可以用来进行预测与分析。

2.2.3 相应曲面分析

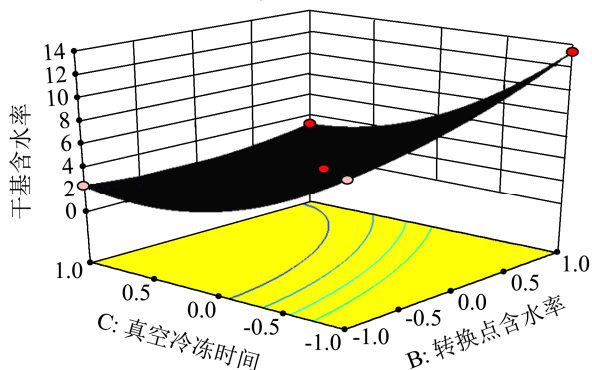


图7 真空冷冻干燥时间和转换点含水率交互作用对平菇干基含水率的影响

Fig.7 Effect of interaction between vacuum freezing time and water content of conversion point on the moisture content of *Pleurotus ostreatus*

根据回归方程 (1) 可以得出各因素对平菇干基含水率影响的分析结果。图7直观反应了固定微波功率为280 W后, 真空冷冻干燥时间和转换点含水率的交互作用对平菇干基含水率有较显著的影响, 可以看出真空冷冻时间越长, 干基含水率越低, 转换点含水率越低, 干基含水率越低。

根据回归方程 (2) 可以得出各因素对平菇干燥速率影响的分析结果。图8直观反应了固定真空冷冻干燥10 h后, 转换点含水率和微波功率的交互作用对平菇干燥速率有较显著的影响, 随着转化点含水率的减小, 干燥速率呈大幅下降趋势。原因可能是转换点含水率越低, 平菇中水分越少, 其干燥程度越好, 干燥速率随之下降。

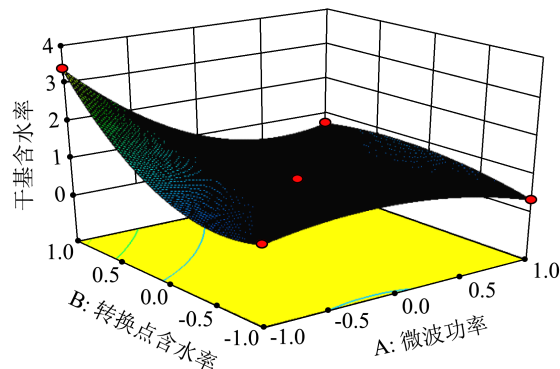


图8 微波功率和转换点含水率交互作用对平菇干燥速率的影响

Fig.8 Effect of interaction between microwave power and water content of conversion point on the drying rate of *Pleurotus ostreatus*

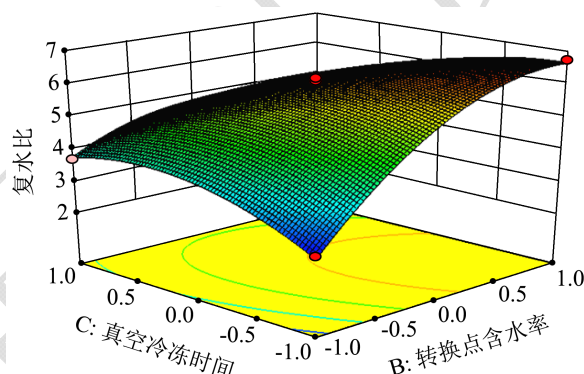


图9 真空冷冻干燥时间和转换点含水率交互作用对平菇复水比的影响

Fig.9 Effect of interaction between vacuum freezing time and water content of conversion point on rehydration ratio of *Pleurotus ostreatus*

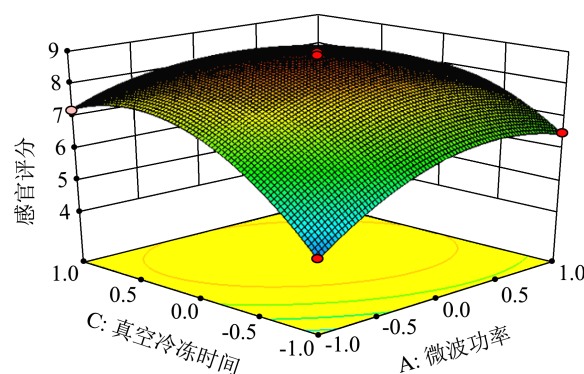


图10 真空冷冻干燥时间和微波功率交互作用对平菇感官评分的影响

Fig.10 Effect of interaction between vacuum freezing time and microwave power on sensory score of *Pleurotus ostreatus*

根据回归方程 (3) 可以得出各因素对平菇复水比影响的分析结果。图9直观反应了固定微波功率为280 W后, 真空冷冻干燥时间和转化点含水率的交互作用对平菇复水比有较显著的影响, 复水比随着真空冷冻

时间、转换点含水率有先增大后减小的趋势。

根据回归方程(4)可以得出各因素对平菇干燥后感官得分影响的分析结果。图10直观反应了固定转化点含水率为35%后,真空冷冻干燥时间和微波功率的交互作用对平菇感官得分有较显著的影响,真空冷冻干燥时间过长或过短和微波功率过高或是过低均对感官得分有影响。

2.2.4 微波-真空冷冻干燥平菇工艺的优化及验证试验

为提高微波-真空冷冻干燥平菇产品的品质,对4个试验指标进行加权综合优化处理,最后得出综合优化工艺参数组合:A=295.4W, B=37.5%, C=11.15 h。在此条件下平菇的干基含水率3.29%、干燥速率0.589 g/(g·min)、复水比6.04、感官得分8.92。

考虑到实际情况下试验操作的可行性,将上述最佳工艺参数修正为:微波功率300 W、转换点含水率37%、真空冷冻干燥时间11 h,做三组平行试验进行验证。获得平菇干燥制品的干基含水率3.37%、干燥速率0.53 g/(g·min)、复水比5.94、感官得分8.71,试验结果与预测值接近,说明工艺优化方法可行。

2.3 干燥后平菇中营养成分的测定

新鲜平菇营养成分丰富,本试验对新鲜平菇的营养成分进行了测定,然后采用上述所得最佳工艺条件进行干燥,对干燥后的平菇产品营养成分进行了再次测定,结果见表5。

表5 鲜、干条件下平菇基本营养成分对比表

Table 5 Comparison of basic nutrients of *Pleurotus ostreatus* under fresh and dry conditions

营养成分	含量/%	
	新鲜平菇	干燥平菇
水分含量	89.7±0.24	3.37±0.06
蛋白质(以干基记)	34.1±0.41	26.5±0.17
粗脂肪(以干基记)	2.01±0.02	2.20±0.04
总糖(以干基记)	32.5±0.29	49.8±0.32

由表5可以看出,微波-真空冷冻联合干燥后的平菇中水分含量下降了86.33%;新鲜平菇中蛋白质含量为34.1%,经过干燥后蛋白质含量降低了7.6%左右;干燥前后粗脂肪的含量相当,分别为2.01%和2.20%;总糖含量变化较大,干燥后增加了17.3%。该数据也可以再次验证平菇的确是一种高蛋白低脂肪的菌类,这与赖姗姗^[2]、寇兴凯等^[6]对平菇不同状态下得到的营养成分分析结果一致。

2.4 干燥方式对平菇干燥单位能耗的影响

表6 单位能耗比较

Table 6 Comparison of unit energy consumption

干燥方式	干燥时间/h	单位能耗/(kJ/g)
微波干燥	0.82±0.02	25.11±0.28
真空冷冻干燥	15.5±0.08	187.93±0.33
联合干燥	10.5±0.04	126.56±0.21

由表6可知,微波-真空冷冻联合干燥所用的时间和单位能耗,比单一真空冷冻干燥分别减少47.6%,48.4%。单一微波干燥能耗虽少,但干燥后平菇收缩率高、复水比低、色泽焦黑品质差,不宜用来进行平菇干燥。而联合干燥后平菇不仅在外形、色泽、质地和风味4个方面都能达到良好的程度^[29],其营养成分也保留更好,因此更具实用价值。

3 结论

3.1 Box-Behnken设计试验结果表明,微波-真空冷冻联合干燥的微波功率、转换点含水率和真空冷冻时间对干燥产品的干基含水率、干燥速率、复水比和感官评分都有显著的影响。经过工艺优化可知,微波-真空冷冻联合干燥的最佳工艺为:微波功率300 W、转换点含水率37%、真空冷冻时间11 h。产品指标回归模型的决定系数较高,依据回归分析法建立的统计模型理论值与试验值吻合度高,该模型拟合度良好,可用于平菇干燥过程中对于结果的预测。

3.2 该试验将微波干燥和真空冷冻干燥技术有机结合,不仅可以减少平菇在微波干燥过程中对其营养成分的破坏,还可解决真空冷冻干燥速率慢,设备干燥负荷大等问题,可为平菇干制品生产提供理论依据。

3.3 相较于目前干燥平菇常用的单一真空冷冻干燥,微波-真空冷冻联合干燥下获得的平菇干燥产品感官品质较好且营养成分保留量高,可在保证其营养的同时,延长平菇的储存时间、提高其商业价值。微波-真空冷冻联合干燥有着效率高、品质优的特点,未来可考虑应用在果蔬干燥行业中。

参考文献

- 王岚,丁武.利用平菇制备食品添加剂技术[J].现代食品,2018,11:193-196
WANG Lan, DING Wu. Preparation of food additive technology using *Pleurotus ostreatus* [J]. Modern Food, 2018, 11: 193-196
- 赖姗姗,陈玉青,刘媛媛,等.平菇不同状态下营养成分分析比较与品质评价[J].食品安全质量检测学报,2018,9(7):1619-1622
LAI Shan-shan, CHEN Yu-qing, LIU Yuan-yuan, et al.

- Analysis and quality evaluation of nutrients in different states of *Pleurotus ostreatus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(7): 1619-1622
- [3] 杜海珍.平菇脆片加工工艺研究[J].现代食品科技,2010, 26(6):630-631
DU Hai-zhen. Study on processing technology of *Pleurotus ostreatus* chips [J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(6): 630-631
- [4] Reis Filipa S, Barros Lillian, Martins Anabela, et al. Chemical composition and nutritional value of the most widely appreciated cultivated mushrooms: An inter-species comparative study [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(2): 191-197
- [5] Akram Kashif, Ahn Jae-Jun, Yoon Sung-Ran, et al. Quality attributes of *Pleurotus eryngii* following gamma irradiation [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 66(1): 42-47
- [6] 寇兴凯,王士奎,李文香,等.微真空贮藏方式对平菇保鲜品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(16): 318-322
KOU Xing-kai, WANG Shi-kui, LI Wen-xiang, et al. Effect of micro-vacuum storage on the preservation quality of *Pleurotus ostreatus* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 318-322
- [7] Pei Fei, Shi Ying, Gao Xingyang, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying [J]. Food Chemistry, 2014, 165: 547-554
- [8] 要志宏,关倩倩,聂相珍,等.食品干燥技术研究进展[J].农业与技术,2016,36(16):249-250
YAO Zhi-hong, GUAN Qian-qian, NIE Xiang-zhen, et al. Research progress in food drying technology [J]. Agriculture and Technology, 2016, 36(16): 249-250
- [9] 张丽文,罗瑞明,李亚蕾,等.食品真空冷冻联合干燥技术研究进展[J].中国调味品,2017,42(3):152-156
ZHANG Li-wen, LUO Rui-ming, LI Ya-lei, et al. Research progress of food vacuum freezing combined drying technology [J]. China Condiment, 2017, 42(3): 152-156
- [10] 夏亚男,侯丽娟,齐晓茹,等.食品干燥技术与设备研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(4):204-208
XIA Ya-nan, HOU Li-juan, QI Xiao-ru, et al. Research progress in food drying technology and equipment [J]. Food Research and Development, 2016, 37(4): 204-208
- [11] 赵圆圆,易建勇,毕金峰,等.干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J].食品科学,2019,40(3):101-108
ZHAO Yuan-yuan, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Effect of drying method on sensory, texture and nutritional quality of rehydrated mushrooms [J]. Food Science, 2019, 40(3): 101-108
- [12] 孙亚男,赵淑芳,李文香,等.平菇冻干预处理工艺优化及其对品质的影响[J].中国果菜,2015,35(6):10-14
SUN Ya-nan, ZHAO Shu-fang, LI Wen-xiang, et al. Optimization of the treatment process of *Pleurotus ostreatus* and its effect on quality [J]. China Fruit Vegetable, 2015, 35(6): 10-14
- [13] 芦菲,李波,程远渡,等.喷雾干燥法制备平菇精粉的工艺研究[J].食用菌,2012,34(6):57-58
LU Fei, LI Bo, CHENG Yuan-du, et al. Study on the preparation of oyster mushroom powder by spray drying method [J]. Edible Fungi, 2012, 34(6): 57-58
- [14] TIAN Yu-ting, ZHAO Ying-ting, HUANG Ji-jun, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chemistry, 2015, 197: 714-722
- [15] 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 Xing-yang, AN Xin-xin, ZHAO Li-yan, et al. Effect of vacuum low-temperature frying and vacuum freeze-drying on the quality and volatile flavor components of shiitake mushroom crisps [J]. Food Science, 2015, 36(17): 88-93
- [16] 刘春菊,江宁,严启梅,等.杏鲍菇真空微波干燥工艺[J].江苏农业科学,2017,45(2):169-173
LIU Chun-ju, JIANG Ning, YAN Qi-mei, et al. *Pleurotus eryngii* vacuum microwave drying process [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 169-173
- [17] 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]
- [18] 薛珊,赵武奇,高贵田,等.苦瓜片气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J].中国农业科学,2017,50(4):743-754
XUE Shan, ZHAO Wu-qi, GAO Gui-tian, et al. Impact drying characteristics and drying model of bitter melon flake gas jet [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(4): 743-754
- [19] 陈健凯,林河通,林艺芬,等.基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J].农业工程学报,2014,30(3):277-284
CHEN Jian-kai, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Optimization of microwave vacuum drying process parameters of *Pleurotus eryngii* based on quality and energy consumption

- [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3):277-284
- [20] Li Xiaobei, Feng Tao, Zhou Feng, et al. Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 358-364
- [21] 孙翠,王钰,沈小瑞,等.杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J].食品与机械,2017,33(2):189-193
SUN Cui, WANG Yu, SHEN Xiao-ru, et al. Optimization of hot air-vacuum freeze-drying process of *Pleurotus eryngii* [J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 189-193
- [22] GB/T 15673-2009,食品安全国家标准 食用菌中粗蛋白含量的测定[S]
GB/T 15673-2009, National Food Safety Standard Determination of crude protein content in edible fungi [S]
- [23] GB 5009.6-2016,食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]
GB 5009.6-2016, National Food Safety Standard Determination of fat in food [S]
- [24] GB/T 15672-2009,食品安全国家标准 食用菌中总糖含量的测定[S]
GB/T 15672-2009, National Food Safety Standard Determination of total sugar content in edible fungi [S]
- [25] 顾思思,刘斌,杨兆丹.胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和多孔特性[J].江苏农业学报,2018,34(4): 897-903
GU Si-zhong, LIU Bin, YANG Zhao-dan. Thermophysical properties and porous properties of carrots under microwave drying conditions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 34(4): 897-903
- [26] 高颖宇,时海波,侯会,等.切片形式对杏鲍菇真空冻结冷冻干燥特性与品质的影响[J].食品科技,2017,42(10): 80-85
GAO Ying-yu, SHI Hai-bo, HOU Hui, et al. The effect of sliced form on the characteristics and quality of vacuum freeze-drying of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 80-85
- [27] Krokida M. K, Marinos-Kouris D. Rehydration kinetics of dehydrated products [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 57(1): 1-7
- [28] DOYMAZ I. Drying kinetics and rehydration characteristics of convective hot-air dried white button mushroom slices [J]. Journal of Chemistry, 2014, 78(2): 512-521
- [29] Wang H, Zhang M, Mujumdar A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1791-1802

(上接第 144 页)

- [14] 王金华.双螺杆挤压工艺对碱面粉中水溶性戊聚糖含量的影响[J].食品科学,2002,23(7):79-83
WANG Jin-hua. Effect of twin-screw extrusion on the content of water-soluble pentosan in alkali flour [J]. Food Science, 2002, 23(7): 79-83
- [15] Ross A S, Quail K J, Crosbie G B. Physicochemical properties of Australian flours influencing the texture of yellow alkaline noodles [J]. Cereal Chemistry,1997, 74(6): 814-820
- [16] Crosbie G B, Ross A S, Moro T, et al. Starch and protein quality requirements of Japanese alkaline noodles (Ramen) [J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(3): 328-334
- [17] 姜松,贾瑜,程红霞,等.基于压杆大挠度理论的挂面弹性模量测定方法[J].中国粮油学报,2010,7:106-109
JIANG Song, JIA Yu, CHENG Hong-xia, et al. A method for the determination of elastic modulus of hanging surface based on the theory of large deflection of compression bar [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 7: 106-109
- [18] Jiang S, Yao D D, Sun K, et al. Effects of different processing conditions on the mechanical properties of dry noodles [J]. Journal of Texture Studies, 2014, 5(5): 387-395
- [19] Tudorica C M, Kuri V, Brennan C S. Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(2): 347-356
- [20] Oh N H, Seib P A, Deyoe C W, et al. Noodles. I. Measuring the textural characteristics of cooked noodles [J]. Cereal Chem., 1983, 60(6): 433-438

(上接第 215 页)

- [19] 张立彦,吴兵,包丽坤.加热对三黄鸡胸肉嫩度、质构及微观结构的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012, 40(8):116-121
ZHANG Li-yan, WU Bing, BAO Li-kun. Effects of heating on tenderness, texture and microstructure of sanhuang chicken breast meat [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(8): 116-121

现代食品科技