

韩俊豪,杨 慧,谢永康,等. 绿芦笋热风-微波联合干燥工艺优化[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):188-194.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.20.030

绿芦笋热风-微波联合干燥工艺优化

韩俊豪,杨 慧,谢永康,朱广成,王 童,翟辰璐,路风银

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心,河南郑州 450002)

摘要:为优化绿芦笋热风-微波联合干制工艺、缩短干燥时间、提升干品品质,以复水比、色差和感官评分为考核指标,基于 Box-Behnken Design 响应面优化热风温度、转化点含水率、微波功率与考核指标的回归模型,得到绿芦笋最佳热风-微波联合干制工艺为:前期热风温度 55 ℃、转化点含水率 42.00%、后期微波功率 300 W。在此条件下,得到复水比为 2.54, a 值为 2.07,感官评分为 15.16。通过实验证明模型可靠有效,可用于生产预测和控制,试验为绿芦笋干制品的制备提供新的思路。

关键词:绿芦笋;联合干燥;热风-微波;工艺优化

中图分类号:TS255.36 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)20-0188-06

芦笋(*Asparagus officinalis*),别名龙须菜、石刁柏^[1],天门冬科植物,富含人类需要的多种矿物质元素、氨基酸及甾皂苷、芸香苷、多糖、胆碱、黄酮、叶酸等生物活性物质^[2],风味独特、柔嫩多汁、营养价值高,能够提高免疫力,调节人体代谢,具有很高的医疗保健功能,是名副其实的食药两用蔬菜,被誉为“蔬菜之王”^[3-6]。研究表明,绿芦笋比白芦笋具有更好的营养价值^[7]。

绿芦笋适宜鲜食,但其含水量高,极易发生失水、木质化、腐烂等现象,干燥脱水处理就是最有效的方法之一^[8],可作为芦笋加工增值的重要手段。联合干燥技术近年来被广泛应用,该技术克服了单一干燥技术的诸多缺点,能够提高果蔬干制品质量、节能环保、干燥速率快、高效、安全等特点,成为科研工作者研究的“新宠儿”^[9],其中,“热风-微波联合”干燥技术是目前应用较广泛的联合干燥技术之一,它根据优势互补原则,克服了热风干燥所需时间长、微波干燥不均匀、能耗大等缺点,已成功应用于胡萝卜、青花菜、生姜、橘子皮、山楂、香椿等多种果蔬干燥^[10-15]。目前,国内对绿芦笋的干燥多

采用真空冷冻干燥^[16-18],鲜见绿芦笋热风-微波联合干燥相关研究与报道。基于此,本试验系统研究热风-微波联合干燥绿芦笋,探讨获取优质绿芦笋的最佳工艺条件,以期达到提升干品品质,同时缩短干燥时间的目的,为芦笋干制产品的研发及废弃物的综合加工利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

绿芦笋(2020 年 4 月由漯河市亿康工贸有限公司提供)。

1.2 仪器与设备

BXH-130S 精密程式烘箱,上海博讯实业有限公司;NN-CD997 实验室专用微波炉,松下电器;FW-80 高速万能粉碎机,北京市永光明医疗仪器有限公司;ColorFlex EZ 台式色差仪,美国 HunterLab 公司。

1.3 方法

1.3.1 干燥处理 热风干燥:准确称取 300 g 鲜芦笋,整株放入网筛平铺均匀后,置于烘箱进行热风干燥,热风温度设置为 60、70、80 ℃,风速设置为 0.3 m/s,相对湿度控制在 15%~30%,每 30 min 称 1 次样品质量,将样品干燥至干基水分含量 0.100 g/g。

微波干燥:准确称取 300 g 鲜芦笋,整株放入网筛平铺均匀后,置于微波炉进行微波干燥。微波功率设置为 100、250、400、550、700 W,相应微波密度(即微波功率与装载量之比)分别为 0.3、0.8、1.3、

收稿日期:2021-03-30

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:182102110026);河南省农业科学院优秀青年科技基金(编号:2020YQ31)。

作者简介:韩俊豪(1990—),男,河南省修武县人,硕士,研究实习员,主要从事农产品产地减损技术及装备研究。E-mail:2469417511@qq.com。

通信作者:路风银,研究员,主要从事农产品保鲜与加工研究。E-mail:lfy1968@163.com。

1.8、2.3 W/g, 进行干燥至干基水分含量 0.100 g/g, 期间每 1 min 称 1 次样品质量。

热风-微波联合干燥: 根据单因素试验结果, 以热风温度、转换点含水率和微波功率为自变量, 采用响应面优化微波-热风联合干燥工艺条件, 试验因素与水平见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平

水平	因素		
	A: 热风温度 (℃)	B: 转换点含水率 (%)	C: 微波功率 (W)
-1	55	40	100
0	60	50	250
1	65	60	400

1.3.2 理化指标的测定

1.3.2.1 干基、湿基含水率测定与干燥速率的计算
水分测定: 采用 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》的方法^[19]。干基含水率: 按式(1)计算。

$$M_t = (m_t - m_g) / m_g \quad (1)$$

式中: M_t 为干基含水率, g/g; m_t 为 t 时刻对应的物料质量, g; m_g 为绝干时物料质量, g。

干燥速率: 按式(2)计算。

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

式中: DR 为干燥速率, g/(g·min); M_{t_1} 和 M_{t_2} 分别为干燥时间在 t_1 和 t_2 时绿芦笋的干基水分含量, g/g。

1.3.2.2 复水比 参考李湘利等的方法^[15], 稍作修改。准确称取 2.0 g 干制后的芦笋, 以 1:100 的质量比置于 25℃ 蒸馏水中浸泡 4 h, 然后取出并通过适度按压去除芦笋表面水分, 复水后芦笋质量(g)与复水前芦笋干品质量(g)的比值即为芦笋的复水比。复水比值大反映产品复水性能好^[20]。

1.3.2.3 色差 将干燥后的绿芦笋放入高速万能粉碎机, 过 100 目筛后, 采用 Color Quest XE 色差仪进行测定。 L^* 值表示亮度, 其范围为 0(黑)~100(白), 其值越大, 颜色越亮; a^* 值表示绿色/红色值, 其值越大表示绿色损失越严重; b^* 值表示蓝色/黄色值, 其值越大颜色越黄^[21]。本试验用绿色值 a^* 值来表征绿芦笋干制后颜色的变化。

1.3.2.4 感官评价 感官评分作为评价果蔬干燥效果的一个重要指标, 参考徐明亮等的方法^[22]进行适当改良。成立 10 名评价人员(5 男 5 女)组成的评价小组, 对冷却后的绿芦笋干制品及时进行感官评价, 具体评价标准见表 2。

表 2 绿芦笋干制品的感官评价标准

项目	评分等级				
	5 分	4 分	3 分	2 分	1 分
色泽	墨绿色	浅绿色	灰绿色	灰色	暗褐色
风味	浓郁的清香气味	有清香气味	香气较淡	有轻微的焦糊味	有明显的焦糊味
组织形态	不变	轻微萎蔫	萎蔫	萎蔫较多	严重萎蔫
口感	松脆	较脆	松软	较硬	生硬

注: 总分值为 20 分, 质量等级设置: >18 分为很好; 18~12 分为一般; <12 分为差。

1.4 数据处理

各处理均重复 3 次, 所有数据采用 Origin 8.6 作图, 用 IBM SPSS Statistics 19.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 绿芦笋的热风干燥结果

2.1.1 热风干燥对绿芦笋失水特性的影响 由图 1 可知, 绿芦笋经 60、70、80℃ 热风干燥后, 其干基水分含量从 11.30 g/g 将至 0.100 g/g 左右所需时间分别为 1 200、840、690 min。热风干燥设置的温度越高, 绿芦笋失水则越快, 干燥时间则越短, 这是由于热风温度越高, 造成芦笋内外温差越大、传质动力越大, 故高温可明显提高芦笋干燥速率, 缩短干燥时间^[23-25]。由图 2 可知, 随着热风温度升高,

干燥速率呈升高趋势, 其中, 60℃ 时热风干燥速率曲线较平缓, 80℃ 时热风干燥速率最高, 为 0.70 g/(g·min), 分别是热风温度 60、70℃ 最高干燥速率的 1.79 倍和 1.35 倍。与多数果蔬干燥一样, 绿芦笋干燥过程同样分为“加速→恒速→降速”3 个干燥阶段, 在干燥初期, 因新鲜芦笋含水率高, 表面水分汽化快, 干燥速率由零升到最大值, 此为加速干燥阶段; 随着表面水分继续蒸发, 干燥速率基本维持恒定, 此时进入短暂的恒速干燥阶段; 当芦笋内部水分扩散速率低于其表面汽化速率时, 此时转为降速干燥阶段^[26]。

2.1.2 热风干燥对绿芦笋复水比和色泽的影响 复水比常用来衡量干制品的吸水能力^[27]。热风干燥对绿芦笋复水比及色泽的影响见图 3。由图 3-a

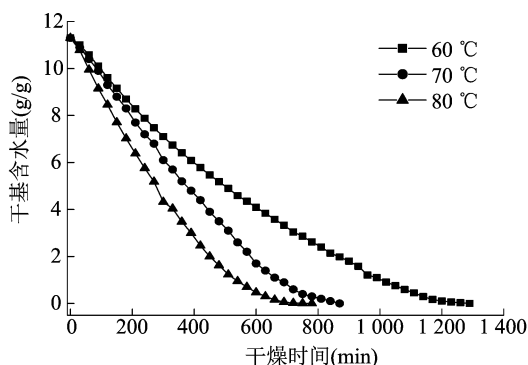


图1 绿芦笋热风干燥曲线

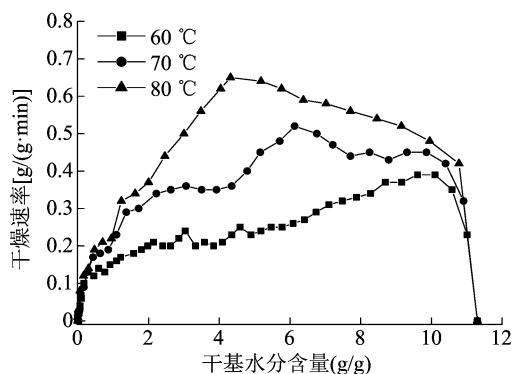


图2 绿芦笋热风干燥速率曲线

可知,复水比随热风温度的升高呈下降趋势,这可能是由于随着热风温度升高,绿芦笋的组织和细胞

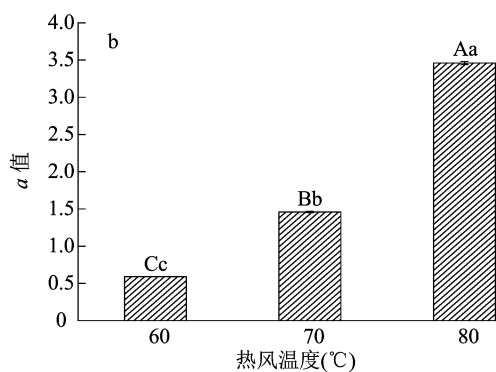
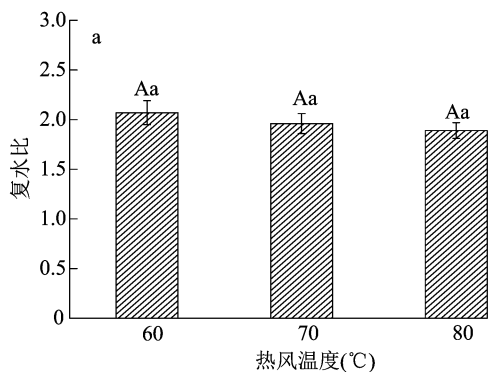
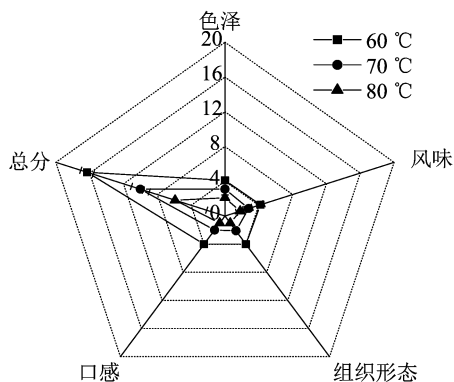
图3 热风干燥对绿芦笋复水比(a)及 a 值(b)的影响

图4 热风干燥对绿芦笋感官评分的影响

破坏越来越严重,同时高温也会使蛋白质部分变性而失去吸水能力,淀粉、果胶等也会发生变化,导致亲水性下降^[27]。当热风温度为 60 °C 时复水比最高,为 2.07,但与 70、80 °C 温度下干制绿芦笋的复水比达不到显著差异 ($P > 0.05$)。由图 3 - b 可知, a 值随热风温度升高呈增大趋势,且当温度为 60 °C 时 a 值最小,为 0.59,极显著低于另外 2 种温度下的绿芦笋干品 a 值 ($P < 0.01$),表明温度越高绿芦笋绿色损失越大,这可能由于绿芦笋中的叶绿素对热比较敏感,温度越高绿芦笋叶绿素热降解越严重。综合考虑,绿芦笋热风干燥温度宜在 60 °C 左右。

2.1.3 热风干燥对绿芦笋感官评价的影响 不同热风温度下绿芦笋感官评价见图 4。由图 4 可知,在色泽方面,在绿芦笋热风干燥过程中,随热风温度的升高其颜色由绿色逐渐变浅绿色、灰绿色、灰色甚至无色,这可能是叶绿素受热发生降解所致。在风味方面,温度 60 °C 干燥的芦笋有明显的清香气味,随着温度的升高,清香气味逐渐消失,当温度为 80 °C 时芦笋伴有轻微的焦糊味,可能是温度升高促使绿芦笋部分糖类与氨基酸发生美拉德反应,并呈现清香味,但随着温度的继续升高发生焦化反应而呈现轻微的焦糊味。在组织形态方面,随着温度的

升高,芦笋萎蔫严重,此与干燥速率相关。在口感方面,随着温度升高,芦笋口感变硬,可能时因为高温使芦笋水分、果胶等物质大量散失,物料发生塌陷收缩,使得硬度增加^[20]。经综合评价,热风温度为 60 °C 时芦笋感官评分最高,极显著高于其他温度 ($P < 0.01$),芦笋感官品质最佳。

2.2 绿芦笋的微波干燥结果

2.2.1 微波干燥对芦笋失水特性的影响 由图 5 可知,微波功率越高,芦笋干燥失水越快,干燥至恒质量所需时间越短。在微波功率为 100、250、400、

550、700 W 时,芦笋达到水分平衡所需要的时间分别为 178、89、48、35、16 min。与热风干燥相比,微波干燥有效缩短了干燥所需时间。由图 6 可知,干燥速率随微波设置功率的升高呈逐渐增大趋势,且微波干燥速率显著高于热风干燥速率,这是由于微波与热风的干燥机理不同,微波干燥是通过电磁波作用物料内部水分子的碰撞摩擦产热,使物料内部和

表面同时进行加热,使物料温度迅速升温,内部水分能快速迁移到物料表面,从而实现快速干燥。绿芦笋微波干燥可分为加速、恒速和降速 3 个干燥阶段,此与任茹娜等的研究^[14]的不一致,可能与微波强度、物料种类、组织结构等有关。此外,微波干燥速率局部呈上下波动趋势,分析可能由微波干燥不均匀导致。

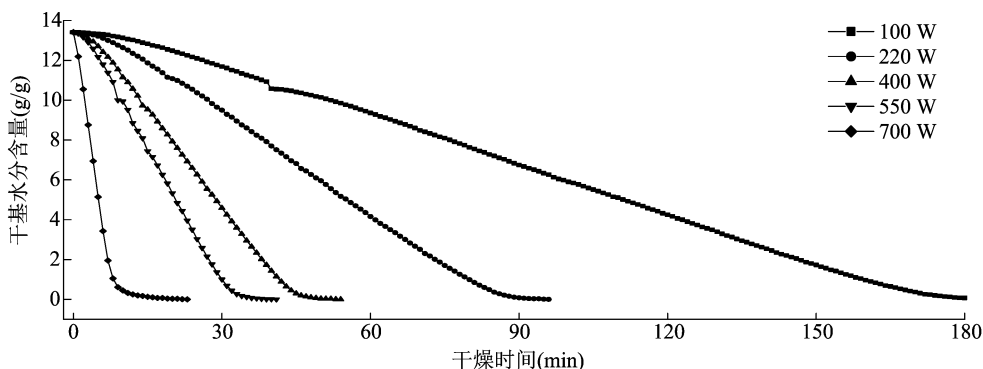


图5 绿芦笋微波干燥曲线

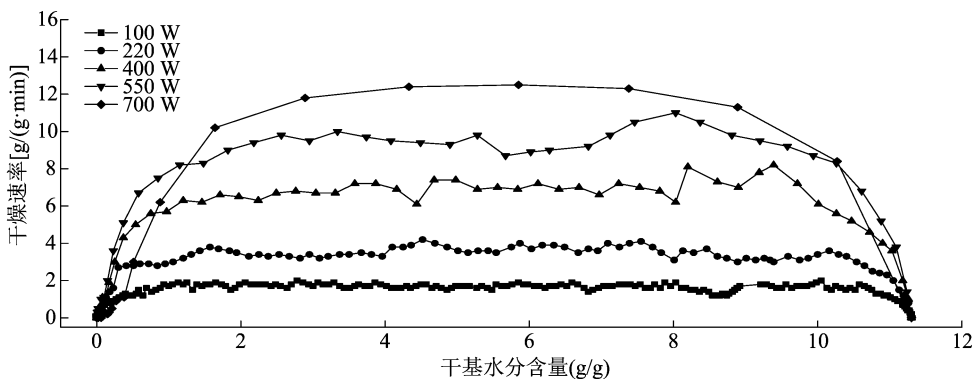


图6 绿芦笋微波干燥速率曲线

2.2.2 微波干燥对芦笋色泽和复水比的影响 微波干燥对绿芦笋复水比及色泽的影响,由图 7-a 可知,复水比随微波功率的增大呈先升高后降低趋势,当微波功率为 400 W 时,复水比最高,为 3.06,但不同微波功率干燥的绿芦笋复水比差异达不到显著水平($P>0.05$)。此与李湘利等研究的微波干燥对大蒜粒复水比的影响^[25]相一致。此外,通过比较,微波干燥的芦笋复水比略高于热风干燥,这可能是因为热风较微波干燥时间长,对物料细胞结构破坏较严重的缘故。由图 7-b 可知, a 值随微波功率的增大呈先升高后降低趋势,当微波功率为 700 W 时 a 值降低,这是因为随着微波功率的增大,缩短了绿芦笋干燥时间,大大降低了微波对叶绿素降解的影响。当微波功率为 100 W 时, a 值最小,为 1.73,极显著低于其他微波处理($P<0.01$),但功率

过低,干燥时间较长,干燥效率低。综合考虑,微波干燥绿芦笋的微波功率在 250 W 为宜。

2.2.3 微波干燥对绿芦笋感官评价的影响 从微波干燥对绿芦笋感官评价雷达图(图 8)可知,在色泽方面,低功率干燥芦笋色泽较好,随着功率的升高,芦笋绿色消失;在风味方面,随着功率增大,清香气味消失;在组织形态和口感方面,低功率与高功率萎蔫严重,且口感偏硬,此与低功率干燥时间长和高功率急促脱水有关。综合评价,微波功率为 250 W 时感官品质最佳。

2.3 响应面优化试验结果

2.3.1 响应面试验方案与结果 基于单因素试验结果,选取先期芦笋热风干燥温度、转换点含水率和后期微波功率为因素,进行绿芦笋的热风-微波联合干燥工艺优化试验,其设计方案及结果见表 3。

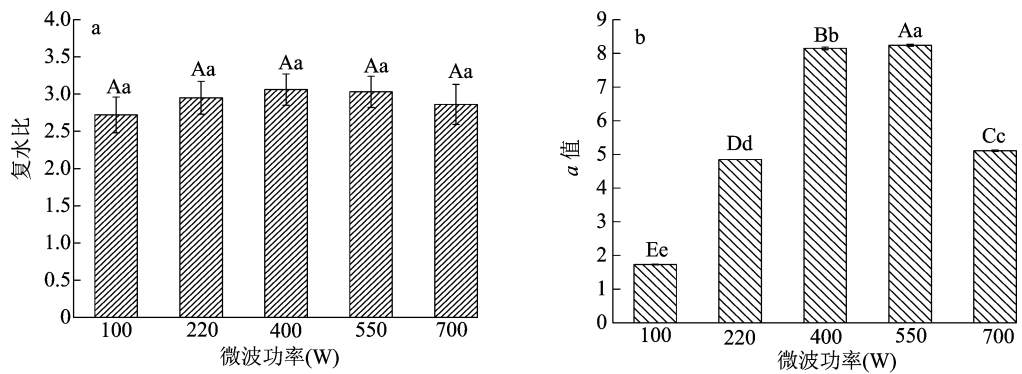


图7 芦笋微波干燥复水比(a)及 a 值(b)

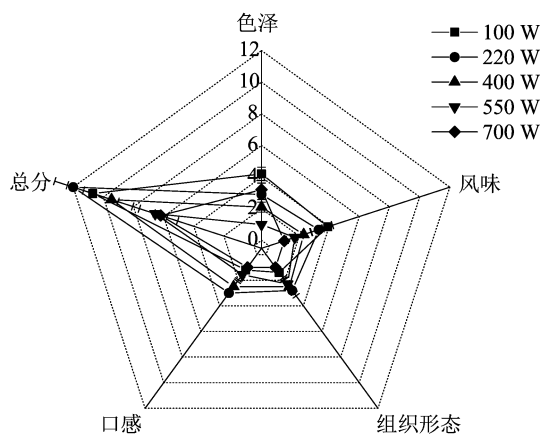


图8 微波干燥绿芦笋感官评价的雷达图

表 3 响应面试验设计方案及结果

试验号	A:热风温度(℃)	B:转换点含水量(%)	C:微波功率(W)	R ₁ :复水比	R ₂ :a 值	R ₃ :感官评分
1	0	0	0	2.514	4.129	14.507
2	-1	1	0	2.253	3.661	10.724
3	1	0	1	2.123	4.652	13.173
4	0	-1	1	2.220	3.427	14.879
5	0	1	-1	2.019	4.570	11.315
6	0	0	0	2.421	4.021	14.372
7	1	-1	0	2.253	4.285	13.848
8	0	0	0	2.413	4.133	14.152
9	-1	0	1	2.290	2.417	14.389
10	1	0	-1	2.034	5.307	12.700
11	1	1	0	2.101	5.247	10.724
12	0	1	1	2.235	4.082	11.839
13	-1	0	-1	2.183	2.909	13.274
14	0	0	0	2.458	3.884	14.541
15	0	0	0	2.357	3.840	14.456
16	0	-1	-1	2.049	3.864	14.000
17	-1	-1	0	2.443	1.990	14.845

2.3.2 回归方程的建立及方差分析 利用 Design - Expert 8.0.6 软件对数据进行二次多项式回归分析,获得各因素对产品复水比、色差及感官评分响应值之间的三元二次回归方程,方程的回归系数及显著性分析见表 4。

$$R_1 = 2.43 - 0.082A - 0.045B + 0.073C + 0.0095AB - 0.0045AC + 0.011BC - 0.072A^2 - 0.098B^2 - 0.20C^2;$$

$$R_2 = 4.00 + 1.06A + 0.50B - 0.26C - 0.18AB - 0.041AC - 0.013BC - 0.19A^2 - 0.021B^2 - 0.0049C^2;$$

$$R_3 = 13.26 - 0.30A - 1.51B + 0.36C + 0.23AB - 0.16AC - 0.10BC - 0.72A^2 - 1.00B^2 - 0.26C^2。$$

由表 4 可知,试验各指标的模型 P 值均小于 0.01,表明回归模型显著;各响应值的失拟项 P 值分别为 0.290 3、0.076 1、0.074 1,均大于 0.05,表明该模型与实际情况拟合质量较好,试验误差小。方程的多重相关系数(R²)分别为 0.9 217、0.9 711、0.9 856,说明试验建立的模型能分别解释 92.17%、97.11% 和 98.56% 响应值的变化,变异系数分别为 2.97%、5.75% 和 1.93%,该模型能很好地表述绿芦笋干品质随热风温度等干燥条件的变化规律。因此,该模型可用来分析和预测热风-微波联合干燥绿芦笋的工艺条件。

由回归方程系数及显著性可知,影响产品复水比的主效应关系依次是:热风温度(A) > 微波功率(C) > 转换点含水量(B),影响产品色差的主效应关系依次是:热风温度(A) > 转换点含水量(B) > 微波功率(C),影响产品感官评分的主效应关系依次是:转换点含水量(B) > 微波功率(C) > 热风温度(A)。热风温度、转换点含水量、微波功率对绿芦笋干品复水比、色差及感官评分的影响均达到极显

表 4 模型回归系数及显著性分析

方差来源	P 值		
	R_1 复水比	R_2 色差	R_3 感官评分
模型	0.004 0**	0.000 1***	<0.000 1***
A	0.001 0**	<0.000 1***	0.006 6**
B	0.102 0	0.000 4***	<0.000 1***
C	0.018 0*	0.013 8*	0.004 6**
AB	0.785 2	0.158 4	0.095 3
AC	0.897 1	0.727 3	0.254 6
BC	0.747 2	0.912 8	0.514 6
A^2	0.064 5	0.134 6	0.000 6***
B^2	0.019 7*	0.856 2	<0.000 1***
C^2	0.000 4***	0.965 4	0.066 0
失拟项	0.290 3	0.076 1	0.074 1
R^2	0.921 7	0.971 1	0.985 6
变异系数(%)	2.970 0	5.750 0	1.930 0

注:***表示高度显著水平($P < 0.001$);**表示极显著水平($P < 0.01$);*表示显著水平($P < 0.05$)。

著水平。

2.5 热风-微波联合干燥绿芦笋工艺的指标优化及验证

利用分析软件 Design-Expert 8.0.6 进行响应面分析并对其进行优化,得到联合干燥绿芦笋的最佳工艺条件为:先期设置热风温度为 55 ℃、转换点含水率 42.62%、后期设置微波功率为 285.56 W。根据实际操作及设备性能,将上述最优条件修正为:先期热风温度 55 ℃、转换点含水率 42%、后期微波功率 300 W,并对该最优工艺进行验证试验。由表 5 可知,验证试验结果与模型理论值较接近,表明所建回归模型具有良好预测效果。

表 5 各指标理论值和验证试验结果

参数	R_1 复水比	R_2 a 值	R_3 感官评分
理论值	2.43	2.19	14.90
验证值	2.51 ± 0.10	2.07 ± 0.27	15.16 ± 0.58

3 结论

本试验以复水比、色差和感官评分为评价指标,采用响应面优化热风温度、转换点含水率、微波功率与评价指标的回归模型,得到绿芦笋最佳热风-微波联合干制工艺为:先期热风温度 55 ℃、转换点含水率 42.00%、后期微波功率 300 W。在此条件下得到复水比为 2.54, a 值为 2.07,感官评分为 15.16。通过试验证明,此模型合理可靠,可用于生产

预测和控制。试验为绿芦笋干制品的制备提供了新的思路,但关于绿芦笋热风-微波联合干燥技术能耗及成本、与其他干燥方式的品质差异等尚需进一步分析和研究。此外,在干燥试验过程中发现,随着干燥时间延长,绿芦笋颜色由绿色变成橄榄色、黄褐色甚至无色,因此,绿芦笋干制过程中叶绿素降解机制及护色处理技术将会是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1]周 驰. 芦笋粉加工关键技术及应用研究[D]. 泰安:山东农业大学,2015:1-2.
- [2]于凯然,况晨光,熊 波,等. 江西省宜春市芦笋产业现状及发展对策[J]. 北京农业,2015(32):154-155.
- [3]康 旭,袁江兰,邓 川,等. 绿芦笋茶挥发性风味成分的 GC-MS 分析[J]. 农产品加工·学刊,2010(12):56-58.
- [4]Ku Y G,Kang D H,Lee C K,et al. Influence of different cultivation systems on bioactivity of asparagus[J]. Food Chemistry,2018,244:349-358.
- [5]Hamdi A,Jaramillo-Carmona S,Beji R S,et al. The phytochemical and bioactivity profiles of wild *Asparagus albus* L. plant[J]. Food research international,2017,99(pt.1):720-729.
- [6]尹培培,杨灵光,王桂宏,等. 两种芦笋不同部位酚类物质及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发,2018,39(21):28-34.
- [7]王明空,何俊萍,王 伟,等. 绿芦笋真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品科学,2006(11):289-293.
- [8]刘佳玮,季阿敏,李福良. 萝卜热泵热风联合干燥的实验[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2012(6):87-90.
- [9]李湘利,刘 静,朱乐乐,等. 热风、微波及其联合干燥对蒜片品质的影响[J]. 食品工业科技,2018,39(15):142-146,152.
- [10]Xu W X,Cao X H,Zhu G Y,et al. Effect of temperature difference on the aroma and quality of carrots processed through microwave drying combined with hot air drying[J]. Food and Bioproducts Processing,2020,20:58-68.
- [11]王 玲,田 冰,彭 林,等. 热风-微波联合干燥青花椒工艺优化[J]. 食品与发酵工业,2019,45(18):176-182.
- [12]岑顺友,刘晓燕,任 飞,等. 微波联合热风干燥生姜片工艺优化[J]. 中国调味品,2020,45(1):99-104.
- [13]Fito P J,Castro-Giraldez M,Talens C. A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel[J]. Journal of Food Engineering,2016,175:33-42.
- [14]任茹娜,巩桂芬. 山楂热风-微波联合干燥工艺优化及动力学模型[J]. 食品工业,2018,39(3):8-13.
- [15]李湘利,刘 静,肖 鲜. 热风与微波及其联合干燥对香椿芽品质的影响[J]. 食品科学,2015(18):92-96.
- [16]王明空,何俊萍,王 伟,等. 绿芦笋真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品科学,2006(11):269-273.
- [17]周福根. 冷冻绿芦笋加工工艺及其质量控制[J]. 农业工程技术(农产品加工),2007(6):23-26.
- [18]汤梦情,陈宏伟,朱蕴兰,等. 微波真空与真空冷冻组合干燥对

张韵晨,方旭波,李莹,等. 铁蛋白-AHLL 纳米颗粒的稳定性及肠吸收研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(20):194-200.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.20.031

铁蛋白-AHLL 纳米颗粒的稳定性及肠吸收研究

张韵晨^{1,2}, 方旭波¹, 李莹², 夏伟荣¹, 柴智², 冯进², 陈小娥¹

(1. 浙江海洋大学食品与药学院, 浙江舟山 316022; 2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

摘要:使用马脾铁蛋白包封降血压活性肽 AHLL, 通过紫外、荧光和圆二光谱研究 AHLL 荷载对 HSF 结构的影响。在此基础上, 研究铁蛋白包封对 AHLL 稳定性以及体外胃肠道消化过程中血管紧张素转化酶 (ACE) 抑制活性的影响作用, 并开展复合纳米颗粒 (HSF-AHLL) 的细胞转运试验。结果表明, AHLL 载运显著降低了 HSF 的 α -螺旋结构和 β -转角结构, 而 β -折叠结构含量和无规卷曲含量增加, 另外, 包埋后 HSF 四重轴通道上的色氨酸微环境被改变。HSF-AHLL 的热稳定性、pH 稳定性和紫外稳定性明显高于游离 AHLL。在模拟胃消化过程中, 结合态与游离态 AHLL 的 ACE 抑制活性在胃液中下降明显, 而在肠液中变化不明显。HSF-AHLL 在 Caco-2 细胞上的转运试验具有一定方向性。吸收 (AP→BL) 大于外排 (BL→AP), HSF-AHLL 在 Caco-2 细胞单层膜上以细胞旁路转运为主, 内吞抑制剂和肽载体抑制剂对 HSF-AHLL 的转运没有明显影响, 而脱氧胆酸钠能打开细胞间通路促进其转运; HSF-AHLL 的转运与多药耐药蛋白抑制剂形成竞争性抑制, HSF-AHLL 的转运对温度具有一定的依赖性, 属于能量依赖型转运。

关键词:马脾脱铁铁蛋白, 血管紧张素转化酶抑制肽; 纳米粒; Caco-2 细胞模型; 转运

中图分类号:S188 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)20-0194-07

本试验所用的 ACE 抑制肽 AHLL 在前期的研究中已证明发现它可以有效抑制 ACE 活性, 在原发性高血压大鼠上具有一定降血压效果^[1]。但由于 AHLL 较不稳定, 容易被消化道里的胃蛋白酶、胰蛋

白酶降解, 从而影响 ACE 的抑制活性^[2], 机体对活性肽 AHLL 的吸收随之也受到影响。铁蛋白结构中包有氢键、盐桥和疏水作用力^[3], 但是, 单独用作纳米载体时易受外界环境、pH 值和温度变化等影响。以往对铁蛋白的研究中, 它作为纳米载体对铁蛋白表面进行修饰, 利用其特有的结构广泛应用在材料学、纳米学^[4-5]等方面, 铁蛋白经过脱铁处理后可包裹特定的活性负载物并对活性负载物起到靶向输送的作用, 这一方法已经在生物医药领域得到应用^[6]。铁蛋白脱铁后变化为特殊的空腔结构, 小分子物质可以通过自由扩散的形式进入空腔, 通过非共价键结合的作用力附和铁蛋白的空腔里。铁

收稿日期:2020-12-12

基金项目:食品科学与技术国家重点实验室开放课题(编号:SKLF-KF-201712)。

作者简介:张韵晨(1996—), 女, 新疆克拉玛依人, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail:rhymezye@163.com。

通信作者:方旭波, 博士, 教授, 主要从事水产品加工与贮藏研究, E-mail:fxb70@163.com; 李莹, 博士, 副研究员, 主要从事食品营养与健康研究, E-mail:hijoly@163.com。

芦笋营养与品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5):84-89.

[19] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.

[20] 姚荷, 谭亦成, 谭兴和, 等. 微波-热风联用制取笋干工艺条件优化[J]. 食品科学, 2019, 40(12):260-266.

[21] 杨慧, 王赵改, 史冠莹, 等. 烫漂时间对香椿嫩芽颜色及挥发性风味成分的影响研究[J]. 核农学报, 2017, 31(7):1339-1348.

[22] 徐明亮, 周祥, 蔡金龙, 等. 不同干燥方法对海芦笋干品质影响[J]. 食品科学, 2010(11):71-75.

[23] Kassem A S, Shokr A Z, El-Mahdy A R, et al. Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2011, 10(1):33-40.

[24] Aral S, Bese A V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity[J]. Food Chemistry, 2016, 210(11):577-284.

[25] 李湘利, 刘静, 侯一超, 等. 大蒜粒微波-热风联合干燥的工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11):237-244.

[26] Askari G R, Emamdjomeh Z, Mousavi S M. An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air/microwave-assisted dehydration[J]. Drying Technology, 2009, 27(7/8):831-841.

[27] 冯寅洁, 石芳荣, 应铁进. 加工工艺和复水条件对脱水胡萝卜复水性的影响[J]. 中国食品学报, 2009, 9(4):155-160.