

黑枣粉喷雾干燥工艺优化

Optimization of spray drying process of dateplum persimmon powder by response surface methodology

乔小全

任广跃

段续

张乐道

QIAO Xiao-quan REN Guang-yue DUAN Xu ZHANG Le-dao

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:为改良黑枣粉的喷雾干燥效果,以河北省赞皇县普通黑枣为原料,采用响应面法优化酶解辅助喷雾干燥制备黑枣粉的工艺。结果表明:在复合酶(果胶酶和纤维素酶)添加量0.2%、温度45℃、pH 4.5、酶解90 min的条件下,可使黑枣中可溶性固形物得率达65.89%;将酶解液可溶性固形物含量浓缩至16%时,对其进行喷雾干燥,在进气温度176℃,阿拉伯胶添加量53%、入料流量818 mL/h条件下,黑枣粉平均得率为26.89%,并且含水率低于5%,适于长期存放。酶解与喷雾干燥相结合的方法能有效地应用于黑枣粉的加工。

关键词:黑枣;喷雾干燥;酶解;果胶酶;纤维素酶

Abstract: In order to improve the drying effect of Dateplum persimmon powder through enzymatic hydrolysis followed by spray drying. The results showed that the total soluble solids contents of dateplum persimmon hydrolysate was 65.89%, when the hydrolysis was performed using 0.2% multi-enzyme (pectinase and cellulase) for 90 min at 45℃ and initial pH 4.5; after pre-concentration to 16%, the hydrolysate was spray dried at an air-inlet temperature of 176℃, under adding the amount of gum Arabic of 53% and feed rate of 818 mL/h, resulting in a powder yield of 26.89% with water content smaller than 5%, and high suitability for long-term storage. Such combination of enzymatic hydrolysis and spray drying could be effectively used for the processing of dateplum persimmon powder.

Keywords: dateplum persimmon; spray drying; enzymatic hydrolysis; pectinase; cellulase

黑枣,又名软枣、君迁子,主要分为有核和无核两大类,君迁子(*Diospyros lotus* L.)是柿树科柿属(*Diospyros* L.)落

叶乔木^[1-2]。黑枣树天然分布于辽宁、河北、山东、陕西及西南各地^[3-4]。开发黑枣产品具有投资小、产量大、经济效益高的特点^[5-6]。黑枣能够提高人体免疫力,抑制癌细胞的生长繁殖^[7],促进体内白细胞的生长,使血清胆固醇含量降低,进而提高血清白蛋白,保护人体的肝脏。对防治骨质疏松、产后贫血都有重要作用。黑枣果含总糖45.70%、果胶3.00%~3.84%、蛋白质1.83%、淀粉41.00%、单宁0.98%,V_C 97.9 mg/100 g,其中V_C含量是梨、苹果、杏、桃等水果的14~32倍^[8-9]。因此,黑枣的营养价值非常高,是多种保健品、食品研发的理想原料。在中国,传统医学已将黑枣果肉用于退热和促进内分泌,对补肾和养胃有明显功效,具有“营养仓库”之称^[10]。

由于酶法水解具有速率快、安全环保等特点,在食品和药品的加工中被广泛应用^[11-12]。纤维素和果胶是影响果蔬出汁率的主要因素,在纤维素酶和果胶酶的协同作用下,果蔬汁的出汁率和产品得率可明显提高^[13]。植物细胞壁上的果胶可被果胶酶分解,促进植物细胞壁的破坏,从而降低果浆的黏度,使出汁率提高至50%或更多^[14]。喷雾干燥技术具备干燥时间短、速度快,广泛应用于果蔬干燥中^[15],由于热风进入干燥室内立即与喷雾液滴接触,室内温度急降,而物料的湿球温度基本不变,因此也适宜于热敏性物料的干燥。综合考虑,运用酶解辅助干燥技术对提高黑枣粉的品质和产量尤为重要。包裹在植物表皮上的纤维素能被纤维素酶分解为纤维二糖和纤维寡聚糖,最后生成可利用的葡萄糖。黑枣浆经果胶酶和纤维素酶处理后,能提高可溶性固形物含量,继而改善喷雾干燥效果,提高黑枣粉得率。

目前,中国关于红枣粗加工产品研究居多。如利用人工干燥和自然干燥技术生产干制枣;采用喷雾干燥、冷冻干燥、真空干燥技术制备红枣粉;利用菌种发酵生产红枣酒、红枣醋、红枣酸奶。此外,还有红枣复合饮料、枣脯、蜜枣等红枣产品^[16]。但关于黑枣深加工的研究较少,对黑枣粉的研究鲜有报道^[17]。本试验拟以黑枣为原料,采用复合酶解辅助

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31671907);河南省高校科技创新团队支持计划资助(编号:16IRTSTHN009)

作者简介:乔小全,男,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail:guangyueyao@163.com

收稿日期:2017-04-10

喷雾干燥技术^[18],利用响应面法对黑枣酶解液的喷雾干燥工艺进行优化,确定进气温度、阿拉伯胶添加量和进料流量等关键参数,为喷雾干燥法制备黑枣粉提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

- 纯天然野生黑枣:采购于河北省赞皇县太行山黑石村;
- 阿拉伯树胶粉(纯度 99.7%):分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;
- 果胶酶:40 U/mg,上海源叶生物科技有限公司;
- 纤维素酶:50 U/mg,上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

- 电子天平:JA-B/N 型,上海佑科仪表有限公司;
- 手持式糖度计:WYT-32 型,上海易测仪器设备有限公司;
- 旋转蒸发器:RE52-3 型,上海沪西分析仪器有限公司;
- 真空干燥箱:VO914B52346-054 型,美国 VWR 公司;
- 电热鼓风干燥箱:GS101-2EB 型,重庆四达试验设备有限公司;
- 实验型喷雾干燥机:SP-1500 型,上海顺仪实验设备有限公司;
- 恒联压榨机:DY-35 型,北京富伟吉祥厨房设备有限公司;
- 打浆机:MJ-BL25B2 型,美的电器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

黑枣→清洗→去核→软化→打浆→酶解、灭酶→过滤→配料→均质(20 MPa,10 min)→浓缩(−0.1 MPa,55 ℃)→喷雾干燥→黑枣粉

1.3.2 操作要点 对黑枣原料 70 ℃水浴处理 2 h,使黑枣皮充分软化,便于酶解和打浆[料液比 1:2 (g/mL)]。精确称取一定的黑枣浆,复合酶添加量为枣浆质量的 0.2%,调节浆液 pH 4.5,温度 50 ℃,酶解 90 min 后,高温灭酶 15 min。之后,对均质好的黑枣汁进行喷雾干燥处理。

1.3.3 喷雾干燥制备黑枣粉的单因素试验设计 通过预试验,预测喷雾干燥的较好参数范围,并实施单因素试验,均实施 3 次平行试验^[19]。

(1) 进气温度:固定入料流量为 900 mL/h、入料浓度为 16%,阿拉伯胶添加量为 45%,考察进气温度(145,155,165,175,185,195 ℃)对黑枣粉集粉率的影响。

(2) 阿拉伯胶添加量:固定入料流量为 900 mL/h、进气温度为 175 ℃、入料浓度为 16%,考察阿拉伯胶添加量(35%,40%,45%,50%,55%,60%)对黑枣粉集粉率的影响。

(3) 入料流量:固定进气温度为 175 ℃、入料浓度为 16%,阿拉伯胶添加量为 45%,考察入料流量(500,600,700,800,900,1 000 mL/h)对黑枣粉集粉率的影响。

(4) 入料浓度:固定入料流量为 900 mL/h、进气温度为 208

175 ℃、阿拉伯胶添加量为 45%,考察入料浓度(7%,10%,13%,16%,19%,22%)对黑枣粉集粉率的影响。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 可溶性固形物含量的测定 准确称取一定量的黑枣酶解液,搅拌均匀后,使用阿贝折射仪测定其可溶性固形物的含量,即入料浓度^[20]。

1.4.2 水分的测定 准确称量黑枣粉 5 g 置于已恒量的有盖称量瓶中,置于 105 ℃的恒温鼓风干燥箱中,干燥 2~4 h,盖好盖子取出,在干燥器内冷却 0.5 h 后称量。重复操作,直至前后 2 次的质量差<2 mg,即为恒重,按式(1)计算水分含量。

$$X=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\%,$$

(1)

式中:

X——水分含量,%;

m_1 ——干燥前黑枣粉质量,g;

m_2 ——干燥后黑枣粉恒质量,g。

1.4.3 黑枣粉集粉率的计算 黑枣粉的集粉率按式(2)进行计算^[11]。

$$A=\frac{M}{w\times M_0}\times 100\%,$$

(2)

式中:

A——集粉率,%;

M——干燥后黑枣粉的干基质量,g;

w ——干燥前黑枣酶解浓缩液中可溶性固形物质量分数,%;

M_0 ——进料量,g。

1.4.4 溶解度的测定 称取 1 g 黑枣粉加入 100 mL 水,100 r/min 高速搅拌 5 min,3 000 r/min 离心 5 min,取上清液 25 mL 置于 105 ℃烘干,按式(3)计算上清液中干物质含量所占的比例^[21]。

$$B=\frac{m_3}{m_4}\times 100\%,$$

(3)

式中:

B——溶液度,%;

m_3 ——上清液中干物质的质量,g;

m_4 ——黑枣粉的质量,g。

1.4.5 堆积密度的测定 称量 5 g 黑枣粉在同一高度装入 15 mL 的量筒,并振动量筒,记录体积,按式(4)计算堆积密度。

$$D=\frac{m}{V},$$

(4)

式中:

D——堆积密度,g/mL;

m ——黑枣粉质量,g;

V——黑枣粉体积,mL。

1.5 数据处理

试验数据均用 Origin 8.5 与 Design-Expert 8.05 进行处理与分析^[22]。

2 结果与分析

2.1 喷雾干燥单因素试验结果

2.1.1 进气温度对黑枣粉集粉率的影响 由图 1 可知,随着进气温度的升高,黑枣粉集粉率逐渐增大,温度继续升高,集粉率逐渐下降,集粉率在 170 ℃ 时达最大值。因为黑枣浆液中的气流分子无规则运动的剧烈程度随着进气温度的升高而加剧,水分蒸发速率加快,进而提高产品得率;在进气温度低于 170 ℃ 的条件下,集粉率出现降低的现象,黑枣浆液的喷雾干燥速度因进气温度的降低而下降,物料不能在干燥塔内完全干燥,部分半干颗粒出现黏壁现象,产品得率低,并且在喷雾干燥过程中,黑枣浆液中的肉质颗粒容易发生碰撞而黏结,伴随流液现象;在进气温度高于 170 ℃ 的情况下,随着进气温度的不断升高,集粉率出现降低的现象,可能是进气温度过大,会使干燥后期料液温度增大到黏流温度,并且黑枣浆液中糖类在干燥室内产生轻微的焦化现象,伴随轻微的热黏壁现象,与甘露醇^[23]及山药^[24]的喷雾干燥研究结果相类似。综合分析,确定进气温度的范围为 160~180 ℃。

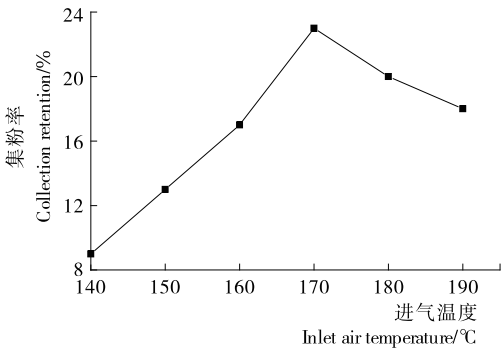


图 1 进气温度对集粉率的影响

Figure 1 The effect of inlet air temperature on powder yield

2.1.2 阿拉伯胶添加量对黑枣粉集粉率的影响 由图 2 可知,阿拉伯胶添加量从 35% 上升到 50% 时,黑枣粉集粉率一直处于上升趋势,但随着添加量的增多,集粉率呈现了下降的趋势,所制备的枣粉颜色变浅,黑枣特有的色、香味变淡。可能是阿拉伯胶添加量过多,导致枣浆浓度过大,浆液流动性差,增加喷雾干燥难度,且随添加量增大,粉体颜色变浅,品质下降。反之,阿拉伯胶添加过少,浆液中糖分的包埋效

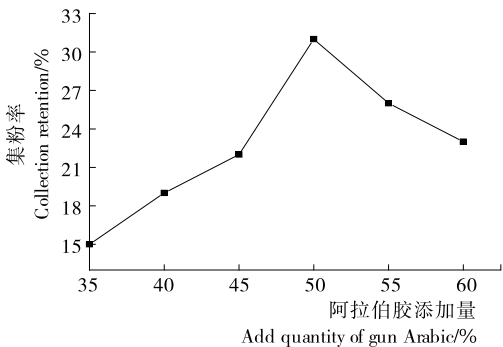


图 2 阿拉伯胶添加量对集粉率的影响

Figure 2 The effect of adding quantity of gum Arabic on powder yield

果不理想,玻璃化转变温度将无法提高,雾化效果较差。与雪莲^[25]、芒果^[26]的研究结果相类似,容易发生黏壁现象。综合分析,阿拉伯胶添加量应选择为料液浓度的 50%。

2.1.3 入料流量对黑枣粉集粉率的影响 由图 3 可知,随入料流量的增大,黑枣粉集粉率呈先升高后下降的趋势,由于在其它试验条件固定不变的情况下,入料流量过快时,出风温度降低^[27],致使雾滴与热空气不能充分接触,水分不能蒸发彻底,并伴随严重黏壁现象,还会导致传质传热效果差,造成集粉率降低。入料流量过慢时,干燥效果也较为理想,但是干燥效率较低。综合分析,选取入料流量为 800~900 mL/h。

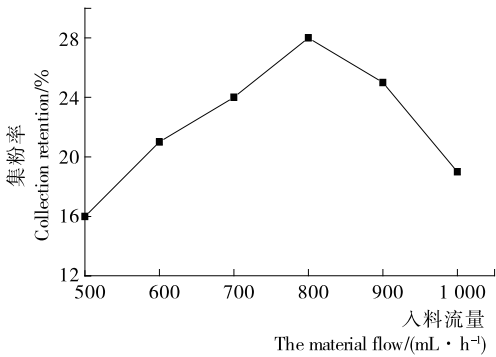


图 3 入料流量对集粉率的影响

Figure 3 The effect of the material flow on powder yield

2.1.4 入料浓度对黑枣粉集粉率的影响 由图 4 可知,当入料浓度在 7%~16% 时,黑枣粉的集粉率随入料浓度的增大而升高,当入料浓度为 16%~24% 时,集粉率开始出现降低的现象。由于入料浓度过低,黑枣浆液含水量大,在喷雾干燥过程中料液蒸发需要量增大,导致物料易呈现半湿状态,黏在干燥室内壁上,造成集粉率降低;而入料浓度过高,黏性大,使料液流动性变弱,喷出速率下降,并且喷头容易出现堵塞现象。综合考虑,入料浓度应选择 16%。

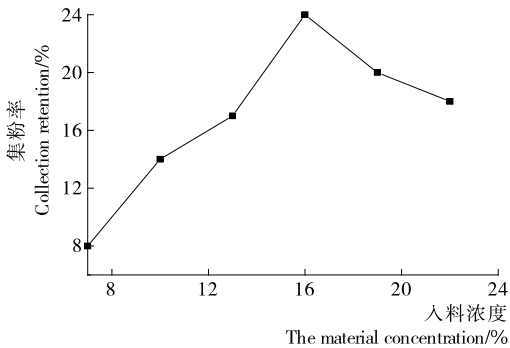


图 4 入料浓度对集粉率的影响

Figure 4 The effect of the material concentration on powder yield

2.2 响应面试验结果

2.2.1 响应面法优化喷雾干燥条件的试验设计 根据单因素试验结果,以进气温度(X_1)、阿拉伯胶添加量(X_2)、入料流量(X_3)为试验因素,以黑枣粉集粉率(Y)为目标,设计三因素三水平的响应曲面试验,对制备黑枣粉的干燥工艺进行优化。试验因子及其水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素与试验水平

Table 1 The factors and levels of Box-Behnken design

编码水平	X ₁ 进气 温度/℃	X ₂ 阿拉伯胶 添加量/%	X ₃ 入料流量/ (mL·h ⁻¹)
-1	160	0.45	800
0	170	0.50	850
1	180	0.55	900

2.2.2 响应面试验设计与试验结果 结合分析各因素对黑枣粉集粉率的影响,以集粉率为主要指标,采用 Box-Behnken 试验设计,进行响应面分析。其试验组合及结果见表 2。

经回归拟合后,得到二次多项式回归方程为:
 $Y=30.84-1.54X_1+5.97X_2-1.47X_3-0.46X_1X_2-X_1X_3+0.015X_2X_3-8.25X_1^2-4.24X_2^2-1.64X_3^2$ 。(5)

2.2.3 黑枣粉集粉率方差分析及响应曲面分析 由表 3 可知,二次回归模型(P<0.000 1)高度显著,而且失拟项(P=0.190 5>0.05)不显著,回归系数 $R^2=0.981\ 4$, $R^2_{Adj}=0.957\ 5$,表明该回归模型可以解释 95.75%响应曲面的变化^[28],此回归模型与实际测量值拟合效果良好,可以使用多项回归方程替代试验点对试验结果进行分析。

由表 3 还可知,一次项 X₂、二次项 X₁²、X₂²对试验结果影响特别显著,一次项 X₁、X₃与二次项 X₃²对试验结果影响显著,交互项对试验结果的影响均为不显著。综合分析,进气温度、阿拉伯胶添加量和入料浓度对试验结果的影响均显著。3 个因素对试验结果影响的主次依次为阿拉伯胶添加量>进气温度>入料流量。

2.2.4 各因素及交互作用对黑枣粉集粉率的影响 由图 5 可知,固定入料流量为 850 mL/h,在进气温度和阿拉伯胶添加量不断增加的情况下,黑枣粉的集粉率先增加后减少,并且进气温度和阿拉伯胶添加量分别在 171~176℃、

表 2 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and results

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	Y/%
1	-1	-1	0	12.89
2	1	-1	0	11.11
3	-1	1	0	26.51
4	1	1	0	22.89
5	-1	0	-1	24.12
6	1	0	-1	22.68
7	-1	0	1	21.23
8	1	0	1	15.79
9	0	-1	-1	19.89
10	0	1	-1	31.02
11	0	-1	1	18.88
12	0	1	1	30.07
13	0	0	0	30.82
14	0	0	0	31.56
15	0	0	0	30.77
16	0	0	0	31.94
17	0	0	0	29.12

0.50%~0.55%时,集粉率有极大值;由图 6 可知,固定阿拉伯胶添加量为 50%时,随着进气温度的增加,集粉率先增加后减少,当进气温度在 173~178 ℃时,集粉率达最高,随着入料流量的增大,集粉率呈现略微升高后趋于稳定;由图 7 可知,固定进气温度为 170 ℃,随着入料流量增大,集粉率先增加后减少,随阿拉伯胶添加量增加,集粉率呈先升高后逐渐趋于稳定的趋势,当入料流量和阿拉伯胶添加量分别在 870~878 mL/h、0.50%~0.54%时,黑枣粉的集粉率达到最大值。

表 3 黑枣粉集粉率方差分析表

Table 3 Anova table of Dateplum persimmon powder collection rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著水平
X ₁	18.85	1	18.85	9.56	0.017 5	α=0.05
X ₂	284.65	1	284.65	144.43	<0.000 1	α=0.01
X ₃	17.23	1	17.23	8.74	0.021 2	α=0.05
X ₁ X ₂	0.85	1	0.85	0.43	0.533 2	不显著
X ₁ X ₃	4.00	1	4.00	2.03	0.197 3	不显著
X ₂ X ₃	9.00×10 ⁻⁴	1	9.00×10 ⁻⁴	4.57×10 ⁻⁴	0.983 5	不显著
X ₁ ²	286.65	1	286.65	145.45	<0.000 1	α=0.01
X ₂ ²	75.73	1	75.73	38.43	0.000 4	α=0.01
X ₃ ²	11.27	1	11.27	5.72	0.048 1	α=0.05
模型	727.51	9	80.83	41.02	<0.000 1	α=0.01
残差	13.80	7	1.97			
失拟项	9.10	3	3.03	2.59	0.190 5	不显著
纯误差	4.69	4	1.17			
总变异	741.30	16				

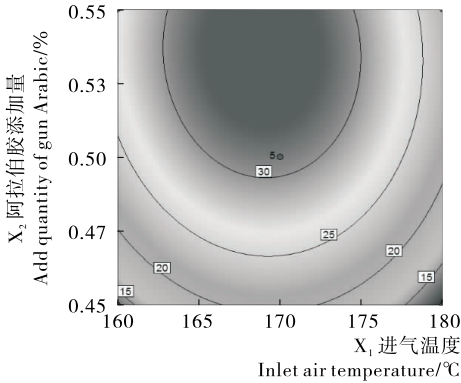
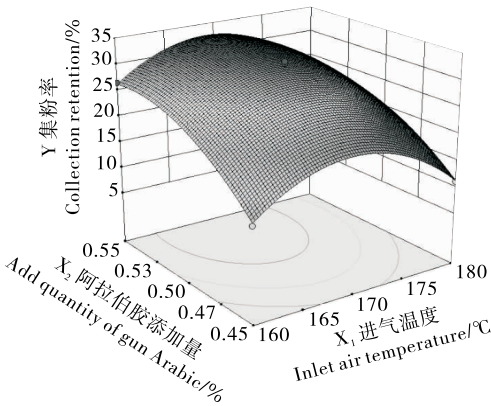


图 5 X_1 和 X_2 对集粉率的影响
Figure 5 The effect of X_1 and X_2 on powder yield

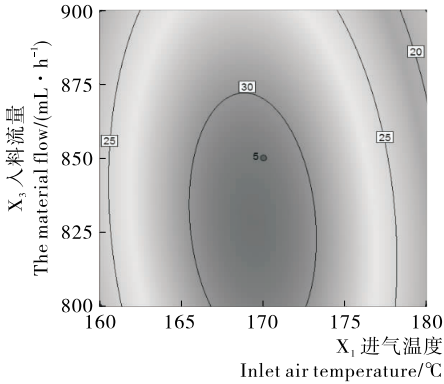
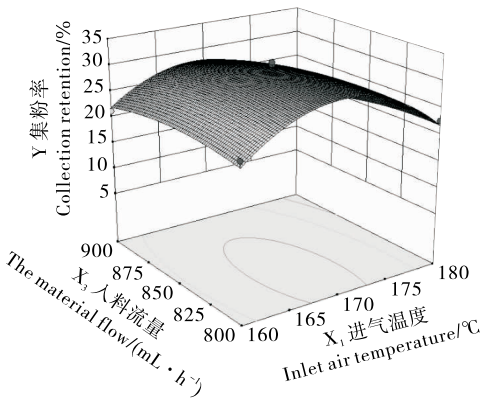


图 6 X_1 和 X_3 对集粉率的影响
Figure 6 The effect of X_1 and X_3 on powder yield

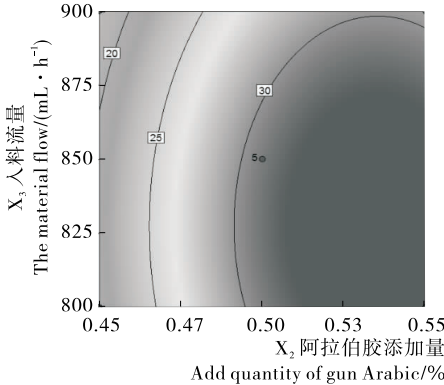
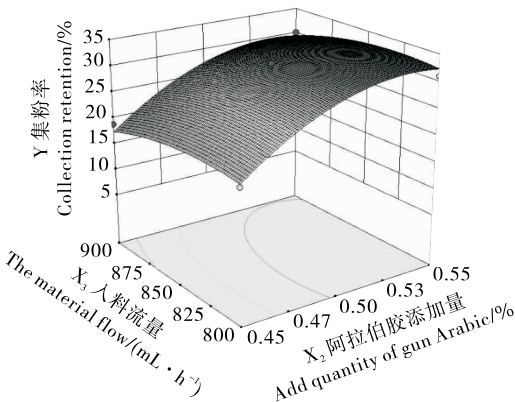


图 7 X_2 和 X_3 对集粉率的影响
Figure 7 The effect of X_2 and X_3 on powder yield

2.2.5 黑枣粉喷雾干燥工艺的优化与验证 根据优化结果可知,黑枣粉喷雾干燥最优工艺条件为进气温度 176.12 °C、阿拉伯胶添加量 53%、入料流量 818.44 mL/h,集粉率为 29.37%。考虑实际操作的可行性,将最优的喷雾干燥条件修改为:进气温度 176 °C,阿拉伯胶添加量 53%,入料流量 818 mL/h。根据修正的最佳干燥条件,实施 3 次重复验证实验^[29],得到黑枣粉的平均集粉率 26.89%,与理论值之差< 5%,表明响应面优化的条件是可行的。

3 结论

黑枣中含有大量的果胶和纤维素,影响出汁率且黏度较大。若不采用酶解技术而直接喷雾,会出现大量黏壁现象,增加喷雾难度,造成浪费。在复合酶(果胶酶和纤维素酶)添加量 0.2%,温度 45 °C, pH 4.5,酶解 90 min 的条件下,出汁率增加,黏度降低,使黑枣中可溶性固形物得率达 65.89%,改善了喷雾效果。综合考虑,酶解辅助喷雾干燥制得黑枣粉品质较优。

利用响应面法优化黑枣酶解液的喷雾干燥工艺。各因素对集粉率的影响为:阿拉伯胶添加量>进气温度>入料流量。喷雾干燥制备黑枣粉的最优工艺:进气温度 176 ℃,阿拉伯胶添加量 53%,入料流量 818 mL/h。该条件下,黑枣粉平均得率 26.89%,堆积密度 0.538 g/mL,且含水率低于 5%,适于长期存放。此工艺参数能为制备黑枣粉提供理论参考,但对黑枣营养成分的影响还需进一步研究。

参考文献

[1] YAMAGISHI Masumi, MATSUMOTO Shigehito, NAKAT-SUKA Akira, et al. Identification of persimmon (Diospyros kaki) cultivars and phonetic relationships between Diospyros species by more effective RAPD analysis[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 105(2): 283-290.

[2] 柏广新. 中国长白山野生花卉[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 187-188.

[3] 滕宁宁, 王明, 吴一飞, 等. 君迁子药学研究概况[J]. 辽宁中医药大学学报, 2010, 12(9): 81-82.

[4] 张达治, 余国莫, 张勉, 等. 藜舌属植物药用研究概况[J]. 中国野生植物资源, 2003, 22(2): 4-7.

[5] ZHOU You-bing, ZHANG Liang, KANEKO Yayoi, et al. Frugivory and seed dispersal by a small carnivore, the Chinese ferret-badger, Melogale moschata, in a fragmented subtropical forest of central China[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(5): 1 595-1 603.

[6] HU De-chang, ZHANG Qing-lin, LUO Zheng-rong. Phylogenetic analysis in some Diospyros spp. (Ebenaceae) and Japanese persimmon using chloroplast DNA PCR-RFLP markers[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 117(1): 32-38.

[7] GLEW R H, AYAZ F A, MILLSON M, et al. Change in sugar, acids and fatty acids in naturally parthenocarpic dateplum persimmon (Diospyros Lotus L.) fruit during maturation and ripening[J]. Eur Food Res Technol, 2005, 221: 113-118.

[8] 唐霞, 梁爽, 张华, 等. 发酵型黑枣酒加工工艺的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(9): 1-4.

[9] 畅凌冰, 王治军, 梁臣, 等. 黑枣的价值及繁育[J]. 绿色科技, 2012, 10(10): 68-69.

[10] 刘慎愕. 东北植物检索表[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 402-403.

[11] 任广跃, 刘亚男, 刘航, 等. 响应面试验优化酶解辅助喷雾干燥制备怀山药粉工艺[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 1-6.

[12] 李小平, 陈锦屏. 油枣多糖的酶法提取及其对多糖分子量分布的影响[J]. 食品科学, 2007, 28(8): 191-194.

[13] 任广跃, 刘航, 刘亚男. 响应面法优化黑蒜酶解液喷雾干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(21): 72-78.

[14] 李长春, 王捷, 张久红, 等. 复合酶对沙棘果汁出汁率的影响[J]. 国际沙棘研究与开发, 2006, 4(4): 8-11.

[15] 王丽娟, 王明力, 高晓明, 等. 喷雾干燥技术在固体饮料中的研究现状[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 155-157.

[16] 周禹含, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 中国红枣加工及产业发展现状[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 214-217.

[17] 高慧, 程妮, 邓建军, 等. 黑枣提取物的抗氧化活性[J]. 食品与

发酵工业, 2011, 37(11): 150-153.

[18] 袁春龙, 张金. 纤维素酶和果胶酶对番茄红素提取的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(13): 100-104.

[19] KOCA N, ERBAY Z, KAYMAK-ERTEKIN F. Effects of spray-drying conditions on the chemical, physical, and sensory properties of cheese powder[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(5): 2 934-2 943.

[20] 张军合, 刘俊红, 李晓芳. 喷雾干燥速溶天然无核枣粉的研制[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(8): 54-58.

[21] 陈启聪, 惠惠华, 王娟, 等. 香蕉粉喷雾干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 331-335.

[22] 樊巧, 陈厚荣, 徐晓萍, 等. 响应面试验优化酪蛋白—魔芋葡甘聚糖共混溶胶制备工艺及其稳定性[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 10-15.

[23] MAAS S G, SCHALDACH G, LIYYRINGER E M, et al. The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol[J]. Powder Technology, 2011, 213(1/2/3): 27-35.

[24] 檀子贞, 王红育, 吴雅静. 山药喷雾干燥粉的加工工艺研究[J]. 食品工程, 2010(1): 31-33.

[25] 石启龙, 赵亚, 马占强. 真空干燥雪莲果粉玻璃化转变温度与贮藏稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 215-219.

[26] 赵金红, 朱明慧, 温馨, 等. 芒果玻璃化转变与状态图研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 226-232.

[27] OZDIKICIERLER O, DIRIM S N S, PAZIR F. The effects of spray drying process parameters on the characteristic process indices and rheological powder properties of microencapsulated plant (Gypsophila) extract powder[J]. Powder Technology, 2014, 253: 474-480.

[28] OIGMAN S S, DE SOUZA R O M A, JÚNIOR H M D S, et al. Microwave-assisted methanolysis of green coffee oil[J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 999-1 004.

[29] 黄婧, 张名位, 辛修锋, 等. 苦瓜粗多糖提取工艺的优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 112-116.