

蓝靛果果粉喷雾干燥工艺优化及其品质

刘晓明¹, 刘盛², 姜贵全², 张卓睿^{2*}

(1. 潍坊科技学院, 山东 寿光 262700; 2. 北华大学 林学院, 吉林 吉林 132013)

摘要: 为优化喷雾干燥制备蓝靛果果粉的工艺参数, 以蓝靛果为原料, 通过单因素和正交试验分析, 确定蓝靛果果粉喷雾干燥的最佳工艺条件, 并对比分析喷雾干燥和真空冷冻干燥所得果粉营养成分及物理特性的差异, 评价喷雾干燥对蓝靛果果粉品质的影响。结果表明: 喷雾干燥的最佳工艺条件为料液比 1:4 (g/mL)、麦芽糊精添加量 15%、进风温度 155 ℃、进样速度 8.4 mL/min、进风量 26 m³/h, 在该条件下, 蓝靛果果粉的得率为 (32.19±0.13)%。喷雾干燥所得果粉花色苷含量为 (4.18±0.31) mg/g, V_C 含量为 (0.42±0.05) mg/g, 总酚含量为 (45.32±0.49) mg/g, 比真空冷冻干燥分别减少了 28.55%、33.33% 和 24.98%, 但喷雾干燥所得果粉具有良好的物理特性, 水分含量少, 粒度小, 溶解性和流动性均优于真空冷冻干燥, 适宜在蓝靛果果粉加工产业中推广应用。

关键词: 蓝靛果; 果粉; 喷雾干燥; 真空冷冻干燥; 品质

Optimization of Spray Drying Technology of *Lonicera caerulea* Fruit Powder and Its Quality Characteristics

LIU Xiaoming¹, LIU Sheng², JIANG Guiquan², ZHANG Zhuorui^{2*}

(1. Weifang University of Science and Technology, Shouguang 262700, Shandong, China; 2. Forestry College, Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China)

Abstract: To optimize the processing parameters of preparing *Lonicera caerulea* fruit powder by spray drying, this study used *L. caerulea* as raw material and determine the optimal processing conditions by single factor experiments and orthogonal experiment. The effects of spray drying and vacuum freeze-drying on the quality of *L. caerulea* fruit powder were evaluated by comparing nutritional components and physical properties. The results showed that the optimal processing conditions of spray drying were 1:4 (g/mL) of solid-liquid ratio, 15% of maltodextrin addition, 155 ℃ of inlet temperature, 8.4 mL/min of feed flow rate, and 26 m³/h of air intake volume. Under these conditions, the yield of *L. caerulea* fruit powder was (32.19±0.13)%. The anthocyanin content of spray dried *L. caerulea* fruit powder was (4.18±0.31) mg/g, vitamin C content was (0.42±0.05) mg/g, and total phenolic content was (45.32±0.49) mg/g. Compared with that prepared by vacuum freeze-drying, it decreased by 28.55%, 33.33%, and 24.98% respectively. However, the fruit powder prepared by spray drying has good physical properties, low moisture content, and small particle size, and the solubility and uidity were significantly better than those of vacuum freeze-drying. The spray drying is suitable for spreading and applying in *L. caerulea* fruit powder processing industry.

Key words: *Lonicera caerulea*; fruit powder; spray drying; vacuum freeze-drying; quality

引文格式:

刘晓明, 刘盛, 姜贵全, 等. 蓝靛果果粉喷雾干燥工艺优化及其品质[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(14): 140-146.

LIU Xiaoming, LIU Sheng, JIANG Guiquan, et al. Optimization of Spray Drying Technology of *Lonicera caerulea* Fruit Powder and Its Quality Characteristics[J]. Food Research and Development, 2023, 44(14): 140-146.

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKH20180351KJ); 吉林市科技创新发展计划项目(20200502085); 吉林省创新创业人才资助项目(2021Y035)

作者简介: 刘晓明(1980—), 男(汉), 副教授, 硕士, 研究方向: 园林及产品综合利用。

* 通信作者: 张卓睿(1978—), 女(汉), 副教授, 硕士, 研究方向: 功能食品开发。

蓝靛果为忍冬科忍冬属多年生落叶灌木,学名蓝靛果忍冬(*Lonicera caerulea* L.),又名羊奶子、山茄子果等^[1],富含维生素^[2]、氨基酸^[3]、花色苷^[4-5]、多酚^[6]及黄酮^[7]等多种活性成分,具有抗氧化^[8]、抗肿瘤^[9]、降血脂^[10]、保护肝脏^[11-12]和预防糖尿病^[13]等慢性疾病的生理功效。蓝靛果为蓝黑色小浆果,口感酸涩,略有苦味,且皮薄多汁,贮运过程中易破损腐烂。因此,与鲜食相比,蓝靛果更适宜加工成产品,如果汁、果酒、果醋等来减少损失率,提升其开发利用价值。

将新鲜水果加工成果粉是近些年果蔬加工的一种新趋势。果粉营养丰富,水分含量低,便于贮藏和运输,能更好地满足当前方便化和功能化的市场需求,而且果粉用途广泛,除可单独食用外,还能作为一种调味、调色、增加营养成分的配料^[14]。目前,果粉的干燥方式主要有喷雾干燥、热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥等^[15-17]。喷雾干燥是将液体物料喷成极细的雾滴,借助热空气进行热交换和质交换来使水分汽化,具有干燥时间短、效率高、产品细而均匀、流动性和溶解性较好等特点^[18],是工业化生产中经常采用的一种干燥方式。但喷雾干燥过程中会使用高温热空气,有可能会造成一些热敏性营养成分的损失。因此,本试验利用喷雾干燥技术制备蓝靛果果粉,优化喷雾干燥工艺条件,并对对比分析喷雾干燥和真空冷冻干燥2种干燥方式对蓝靛果果粉营养成分和物理性质的影响,旨在为蓝靛果的开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝靛果:2021年7月采于北华大学蛟河试验林场,置于北华大学食品加工实验室-80℃冷冻保存。

麦芽糊精(葡萄糖当量值为20):河南雅辉化工产品有限公司;盐酸、乙酸、乙酸钠(均为分析纯):天津市永大化学试剂有限公司;没食子酸(≥98%):上海源叶生物科技有限公司;维生素C标准品(≥98%):成都纳钶锂生物科技有限公司;草酸、碳酸钠(均为分析纯):天津市北辰方正试剂厂;福林酚试剂(分析纯):天津大茂化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FA2004A 电子天平:上海精天电子仪器有限公司;JYL-C16D 榨汁机:九阳股份有限公司;Y100M-2 胶体磨:温州市罗东电机厂;YC-1800 喷雾干燥机:上海雅程仪器设备有限公司;HJ-3 定时恒温磁力搅拌器:江苏省金坛市正基仪器有限公司;LG10-2.4A 高速离心机:北京京立离心机有限公司;OHG-924385 电热恒温鼓风干燥器:上海新苗医疗器械制造有限公司;722N 可见分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司;

Microtrac 激光粒度分析仪:美国麦奇克有限公司;Advanced-II-40 超纯水机:艾柯实验室超纯水机;FDU-1100 型冷冻干燥机:日本东京理化器械株式会社;SteREO Discovery.V20 体视显微镜:德国蔡司公司。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

蓝靛果→挑选清洗→去籽→榨汁→精磨→添加麦芽糊精→过滤→喷雾干燥/真空冷冻干燥→蓝靛果果粉。

1.3.2 操作要点

1)挑选、清洗:选择表面光滑、无机械损伤、未霉变的蓝靛果,用流水清洗干净,晾干。

2)榨汁:将去籽的蓝靛果放入榨汁机中打浆,收集果汁。

3)精磨:将蓝靛果果汁倒入胶体磨中精磨5~10 min,放入冰箱,4℃冷藏、备用。

4)配料、过滤:向精磨后的蓝靛果果汁中加入15%麦芽糊精,充分混匀后,用200目滤布过滤。

5)喷雾干燥:调整喷雾干燥机的进风温度、进样速度和进风量,对蓝靛果果汁进行干燥处理。

6)真空冷冻干燥:蓝靛果果汁先在-28℃预冻20 h,然后在冷阱-44℃、压强0.01 kPa条件下干燥约30 h。

1.3.3 喷雾干燥工艺参数的确定

1.3.3.1 单因素试验

固定麦芽糊精添加量15%,进风温度150℃,进样速度7.0 mL/min,进风量28 m³/h,考察料液比1:1、1:2、1:3、1:4、1:5(g/mL)对蓝靛果果粉得率、水分含量、溶解时间、流动性和花色苷含量的影响;固定料液比1:4(g/mL),进样速度7.0 mL/min,进风温度150℃,进风量28 m³/h,分别测定麦芽糊精添加量10%、15%、20%、25%、30%对蓝靛果果粉得率、水分含量、溶解时间、流动性和花色苷含量的影响;在料液比为1:4(g/mL),麦芽糊精添加量15%,进样速度7.0 mL/min,进风量28 m³/h的条件下,分别控制进风温度为140、145、150、155、160℃进行喷雾干燥,比较不同进风温度对蓝靛果果粉得率、水分含量、溶解时间、流动性和花色苷含量的影响;固定料液比1:4(g/mL),进风温度155℃,麦芽糊精添加量15%,进风量28 m³/h,探讨不同进样速度6.3、7.0、7.7、8.4、9.1 mL/min对蓝靛果果粉得率、水分含量、溶解时间、流动性和花色苷含量的影响;固定料液比1:4(g/mL),麦芽糊精添加量15%,进样速度7.7 mL/min,进风温度155℃,分别考察进风量24、26、28、30、34 m³/h对蓝靛果果粉得率、水分含量、溶解时间、流动性和花色苷含量的影响。

1.3.3.2 正交试验

在单因素试验的基础上,以进风温度(A)、进样速

度(B)、进风量(C)、麦芽糊精添加量(D)为试验因素,蓝靛果果粉得率为评定指标,进行四因素三水平 $L_9(3^4)$ 的正交试验分析,优化蓝靛果果粉喷雾干燥的工艺条件。因素与水平编码见表1。

表1 正交试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiments

水平	因素			
	A 进风温度/℃	B 进样速度/(mL/min)	C 进风量/(m ³ /h)	D 麦芽糊精添加量/%
1	150	7.0	24	10
2	155	7.7	26	15
3	160	8.4	28	20

1.3.4 性能指标的检测

1.3.4.1 蓝靛果果粉得率

蓝靛果果粉得率($Y, \%$)计算公式^[19]如下。

$$Y = \frac{m_1}{m_2 + m_3} \times 100$$

式中: m_1 为蓝靛果果粉质量,g; m_2 为干燥前蓝靛果质量,g; m_3 为调配时所加配料质量,g。

1.3.4.2 溶解时间测定

称取1g蓝靛果果粉,倒入250 mL烧杯中,加入25℃、100 mL蒸馏水,用磁力搅拌器搅拌使其充分溶解,记录果粉溶解所用时间^[20]。

1.3.4.3 稳定性测定

称取1g蓝靛果果粉,倒入250 mL烧杯中,加入25℃蒸馏水100 mL,用磁力搅拌器搅拌使其充分溶解,取上清液10 mL,倒入具塞试管中,放入冰箱上层静置5 d,测定析出的水层高度和样品总高度,计算稳定性($W, \%$)^[21],公式如下。

$$W = \frac{L_s - L_w}{L_s} \times 100$$

式中: L_w 为水层高度,cm; L_s 为样品总高度,cm。

1.3.4.4 流动性测定

垂直固定直径1 cm的漏斗,漏斗口与桌面相距约8 cm,桌面放一张白纸,将2 g蓝靛果果粉从漏斗口加入,测定其在白纸上所形成直径大小,直径越大则果粉的流动性越好^[22]。

1.3.4.5 水分含量的测定

水分含量参照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[23]中直接干燥法进行测定。

1.3.4.6 花色苷的检测

取1g蓝靛果果粉,用蒸馏水溶解后定容至10 mL,采用pH示差法^[24]测定花色苷含量。

1.3.4.7 V_c 含量的测定

取1g蓝靛果果粉,加入1%草酸溶液定容至10 mL,采用分光光度法^[25]测定 V_c 含量。

1.3.4.8 总酚含量的测定

取1g蓝靛果果粉,用蒸馏水溶解后定容至10 mL,采用福林酚法^[26]测定总酚含量。

1.3.4.9 粒度的测定

利用激光粒度分析仪测定样品的粒度。取适量样品置于激光粒度分析仪的样品槽中,将样品平铺均匀,以70%乙醇为分散介质,启动发生器使样品充分分散,测量范围为0.1~1 000.0 μm 。

1.3.4.10 显微镜观察

取适量样品分别在体式显微镜放大20、40、80倍下观察,保存成像良好的照片。

1.4 数据处理

用Excel 2013进行数据处理,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,试验重复3次;使用SPSS 19.0软件对试验结果进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 料液比对蓝靛果果粉品质的影响

不同料液比对喷雾干燥所得蓝靛果果粉各项指标的影响结果见表2。

表2 料液比对喷雾干燥效果的影响

Table 2 Effect of solid-liquid ratio on spray drying

料液比/(g/mL)	水分含量/%	溶解时间/s	花色苷含量/(mg/g)	流动性/cm	得率/%
1:1	3.07 $\pm$ 0.08	57.00 $\pm$ 0.28	3.43 $\pm$ 0.22	11.70 $\pm$ 0.07	14.41 $\pm$ 0.13
1:2	3.38 $\pm$ 0.16	46.00 $\pm$ 0.19	3.85 $\pm$ 0.25	11.90 $\pm$ 0.11	23.35 $\pm$ 0.17
1:3	3.60 $\pm$ 0.14	39.00 $\pm$ 0.32	4.29 $\pm$ 0.18	12.00 $\pm$ 0.05	25.27 $\pm$ 0.19
1:4	3.74 $\pm$ 0.13	34.00 $\pm$ 0.07	4.22 $\pm$ 0.11	11.80 $\pm$ 0.06	27.71 $\pm$ 0.21
1:5	4.02 $\pm$ 0.07	41.00 $\pm$ 0.25	4.06 $\pm$ 0.13	11.60 $\pm$ 0.08	24.36 $\pm$ 0.12

由表2可以看出,随着配料用水量的增加,蓝靛果果粉的水分含量逐渐增大,从(3.07 $\pm$ 0.08)%增大至(4.02 $\pm$ 0.07)%,说明配料用水量的增加对蓝靛果果粉含水量有一定的影响,但变化幅度不大;随着用水量增加,花色苷含量先增大后减小,当料液比为1:3(g/mL)时,蓝靛果果粉的花色苷含量最高,为(4.29 $\pm$ 0.18)mg/g,料液比为1:4(g/mL)时果粉中花色苷含量次之,为(4.22 $\pm$ 0.11)mg/g;果粉得率随用水量增加,先增大后减小,料液比为1:4(g/mL)时的果粉得率最高,为(27.71 $\pm$ 0.21)%,且此时所得果粉的溶解时间最短,为(34.00 $\pm$ 0.07)s,冲溶性能最好;不同用水量所得果粉的流动性变化幅度 $\leq$ 0.40 cm,说明料液比对果粉的流动性影响不大。综合衡量各项指标,选择蓝靛果果粉喷雾干燥的料液比为1:4(g/mL)。

2.2 麦芽糊精添加量对蓝靛果果粉品质的影响

麦芽糊精添加量对蓝靛果果粉各项指标的影响如表3所示。

表 3 麦芽糊精添加量对喷雾干燥效果的影响
Table 3 Effect of maltedextrin addition on spray drying

麦芽糊精 添加量/%	水分 含量/%	溶解 时间/s	花色苷含量/ (mg/g)	流动性/cm	得率/%
10	4.95±0.19	61.00±0.37	4.23±0.15	10.70±0.06	18.21±0.17
15	3.69±0.15	33.00±0.29	4.19±0.12	11.90±0.11	28.29±0.09
20	3.11±0.14	59.00±0.38	3.61±0.19	12.10±0.09	29.43±0.23
25	2.96±0.13	88.00±0.44	3.04±0.32	12.50±0.07	29.49±0.15
30	2.87±0.22	104.00±0.51	2.77±0.21	12.60±0.08	29.51±0.26

麦芽糊精有利于喷雾干燥过程中脱除水分,且麦芽糊精能够在果粉表面成膜,可降低干燥过程中果粉的结块和粘壁问题,提高产品的得率。由表 3 可知,随着麦芽糊精添加量的增加,蓝靛果果粉的得率逐渐增大,当麦芽糊精添加量增加到 20%时,果粉得率达到(29.43±0.23)%,之后再继续提高麦芽糊精的添加量,果粉得率开始缓慢升高,变化幅度不大,因此蓝靛果果粉喷雾干燥时麦芽糊精添加量可以控制在 20%以内;随着麦芽糊精添加量的增加,果粉花色苷含量和果粉溶解性能均会降低,与麦芽糊精添加量 20%相比,添加量 15%时所得蓝靛果果粉的花色苷含量高 0.58 mg/g,溶解时间减少了 26.00 s,而果粉得率仅比前者少 1.14%。另外,麦芽糊精有利用提高果粉的流动性,当麦芽糊精添加量由 10%提高到 15%,果粉的流动性由(10.70±0.06)cm 快速增加到(11.90±0.11)cm,之后继续提高麦芽糊精添加量,增加幅度减缓。因此,综合衡量各项指标,确定麦芽糊精添加量的最优水平为 15%。

2.3 进风温度对蓝靛果果粉干燥效果的影响

进风温度对喷雾干燥所得蓝靛果果粉各项指标的影响结果如表 4 所示。

表 4 进风温度对喷雾干燥效果的影响
Table 4 Effect of inlet temperature on spray drying

进风 温度/℃	水分 含量/%	溶解 时间/s	花色苷含量/ (mg/g)	流动性/cm	得率/%
140	6.97±0.24	42.00±0.11	4.64±0.13	8.60±0.09	16.43±0.27
145	5.41±0.18	40.00±0.17	4.38±0.04	9.80±0.12	23.11±0.24
150	4.03±0.25	36.00±0.33	4.12±0.08	11.70±0.05	28.32±0.11
155	2.71±0.14	34.00±0.29	3.85±0.06	11.90±0.04	29.05±0.22
160	2.89±0.08	47.00±0.07	2.71±0.02	11.60±0.07	27.33±0.15

由表 4 可以看出,进风温度 155℃时所得果粉的各项指标均较好,得率最高,为(29.05±0.22)%,水分含量最少,为(2.71±0.14)%,果粉的流动性最大,为(11.90±0.04)cm,溶解时间最短,仅需(34.00±0.29)s,其花色苷含量虽与含量最高的 140℃干燥果粉相差 0.79 mg/g,但其他指标皆优于后者。当进风温度较低时,雾滴在干燥室内脱水不充分、不能完全干燥而粘在器壁上,

产品得率较低,而且由于所得果粉水分含量高,其流动性也较差;但进风温度过高,又容易造成蓝靛果中的糖类、酸类等物质发生热熔挂壁现象,反而会吸附一些已干燥的果粉,影响产品得率^[27],且喷雾干燥的温度过高,容易使雾滴表面形成硬壳,产生焦糊现象,不利于果粉的溶解,同时花色苷等活性物质的热稳定性较差,过高温度会导致分解,损失严重,使果粉整体品质下降。因此,综合衡量分析,选择 155℃作为进风温度的最优水平。

2.4 进样速度对蓝靛果果粉干燥效果的影响

进样速度对喷雾干燥所得蓝靛果果粉各项指标的影响结果如表 5 所示。

表 5 进样速度对喷雾干燥效果的影响
Table 5 Effect of feed flow rate on spray drying

进样速度/ (mL/min)	水分 含量/%	溶解 时间/s	花色苷含量/ (mg/g)	流动性/cm	得率/%
6.3	2.87±0.22	31.00±0.17	3.95±0.09	11.90±0.14	26.98±0.31
7.0	2.94±0.16	40.00±0.34	3.81±0.13	11.80±0.07	28.59±0.25
7.7	3.01±0.14	26.00±0.36	3.97±0.26	11.70±0.05	29.07±0.21
8.4	3.11±0.18	29.00±0.42	4.09±0.12	11.70±0.06	28.74±0.19
9.1	3.99±0.27	32.00±0.09	3.87±0.07	11.60±0.08	26.56±0.28

由表 5 可知,随着进样速度的增加,蓝靛果果粉的得率先增大后减小,当进样速度达到 7.7 mL/min 时,得率达到最大值,为(29.07±0.21)%,之后再继续提高进样速度,产品得率开始下降。另外,进样速度越快,物料在设备中停留时间越短,雾滴表面不易形成硬壳,溶解性好,花色苷损失少,进样速度 8.4 mL/min 所得蓝靛果果粉花色苷含量最高,为(4.09±0.12)mg/g,进样速度 7.7 mL/min 所得蓝靛果果粉花色苷含量次之,为(3.97±0.26)mg/g,但此时所得果粉溶解时间最短,为(26.00±0.36)s,溶解性能最好。综合衡量各项指标,选择 7.7 mL/min 作为进样速度的最优水平。

2.5 进风量对蓝靛果果粉干燥效果的影响

进风量对喷雾干燥所得蓝靛果果粉各项指标的影响结果如表 6 所示。

表 6 进风量对喷雾干燥效果的影响
Table 6 Effect of air intake volume on spray drying

进风量/ (m³/h)	水分 含量/%	溶解 时间/s	花色苷含量/ (mg/g)	流动性/cm	得率/%
24	3.23±0.14	30.00±0.19	3.24±0.16	11.60±0.15	30.92±0.13
26	3.09±0.17	25.00±0.23	4.01±0.21	11.70±0.09	31.64±0.17
28	3.01±0.15	32.00±0.18	4.06±0.13	11.80±0.11	29.75±0.21
30	3.44±0.22	31.00±0.33	3.89±0.32	11.60±0.07	28.04±0.35
34	3.59±0.18	27.00±0.27	3.72±0.14	11.60±0.07	26.13±0.18

从表 6 可以看出,进风量为 26 m³/h 时,蓝靛果果粉的得率最高,为(31.64±0.17)%,所需溶解时间最短,

为 (25.00 ± 0.23) s,而流动性和花色苷含量与最佳值都相差较小。进风量低,雾滴脱水效果差,而进风量过高,又易使雾滴干燥时间短,易黏附在干燥室壁上,两种情况均会导致果粉水分含量高、得率低^[28]。因此,综合考虑分析,选择 $26\text{ m}^3/\text{h}$ 作为进风量单因素试验的最优水平。

2.6 蓝靛果果粉喷雾干燥工艺的优化

蓝靛果果粉喷雾干燥工艺的正交试验结果见表7。

表7 正交试验设计与结果
Table 7 Design and results of orthogonal experiments

试验号	A	B	C	D	得率/%
1	1	1	1	1	27.17
2	1	2	2	2	28.24
3	1	3	3	3	28.89
4	2	1	2	3	30.32
5	2	2	3	1	29.79
6	2	3	1	2	31.14
7	3	1	3	2	27.17
8	3	2	1	3	27.05
9	3	3	2	1	29.13
k_1	28.100	28.220	28.453	28.697	
k_2	30.417	28.360	29.230	28.850	
k_3	27.783	29.720	28.617	28.753	
R	2.634	1.500	0.777	0.153	

通过比较各因素的极差值,可知各工艺参数对蓝靛果果粉喷雾干燥工艺影响的主次顺序为进风温度>进样速度>进风量>麦芽糊精添加量;各因素的最优水平组合为 $A_2B_3C_2D_2$,即进风温度 $155\text{ }^\circ\text{C}$ 、进样速度为 8.4 mL/min 、进风量 $26\text{ m}^3/\text{h}$ 、麦芽糊精添加量 15% 。对正交试验结果进行方差分析,如表8所示。

表8 方差分析
Table 8 Analysis of variance

方差来源	偏差平方和	自由度	F值	F临界值	显著性
进风温度	12.402	2	344.500	$F_{0.01}(2,2)=99.000$	**
进样速度	4.119	2	114.417	$F_{0.01}(2,2)=99.000$	**
进风量	1.006	2	27.944	$F_{0.05}(2,2)=19.000$	*
麦芽糊精添加量	0.036	2	1.000		
误差	0.04	2			
总和	487.861	10			

注:**表示对结果影响极显著($P<0.01$),*表示对结果影响显著($P<0.05$)。

从表8可知,蓝靛果果粉喷雾干燥的各项工艺参数中,进风温度和进样速度的 F 值分别为344.500和114.417,对试验结果影响极显著($P<0.01$),进风量的 F 值为27.944,对结果影响显著($P<0.05$)。

2.7 验证试验

按照正交试验所优化的最佳工艺条件 $A_2B_3C_2D_2$,进

行验证试验,测得蓝靛果果粉的得率为 $(32.19\pm 0.13)\%$,水分含量为 $(3.01\pm 0.08)\%$,溶解时间为 (24.00 ± 0.29) s,花色苷含量为 $(4.18\pm 0.31)\text{ mg/g}$,流动性为 $(11.90\pm 0.15)\text{ cm}$ 。同时对组合 $A_2B_3C_2D_1$,即进风温度为 $155\text{ }^\circ\text{C}$ 、进样速度为 8.4 mL/min 、进风量 $26\text{ m}^3/\text{h}$ 、麦芽糊精添加量 10% 进行验证试验,测得蓝靛果果粉的得率为 $(28.87\pm 0.42)\%$,水分含量为 $(3.45\pm 0.23)\%$,溶解时间为 (37.00 ± 0.11) s,花色苷含量为 $(4.24\pm 0.08)\text{ mg/g}$,流动性为 $(10.50\pm 0.26)\text{ cm}$,除花色苷含量略高外,其余指标皆低于正交试验所优化的工艺条件。因此,选择 $A_2B_3C_2D_2$,即进风温度为 $155\text{ }^\circ\text{C}$ 、进样速度为 8.4 mL/min 、进风量 $26\text{ m}^3/\text{h}$ 、麦芽糊精添加量 15% 为蓝靛果果粉喷雾干燥的最佳工艺条件。

2.8 喷雾干燥蓝靛果果粉的性能指标

2.8.1 果粉中活性物质的含量

分别检测了喷雾干燥和真空冷冻干燥蓝靛果果粉的主要活性物质,结果见表9。

表9 不同干燥方式对蓝靛果果粉活性成分的影响
Table 9 Effects of different drying methods on active ingredients of *Lonicera caerulea* fruit powder

干燥方式	花色苷含量/(mg/g)	V_c 含量/(mg/g)	总酚含量/(mg/g)
喷雾干燥	4.18 ± 0.31^b	0.42 ± 0.05^a	45.32 ± 0.49^b
真空冷冻干燥	5.85 ± 0.35^a	0.63 ± 0.09^a	60.41 ± 0.54^a

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

由表9可知,喷雾干燥所得蓝靛果果粉的花色苷含量为 $(4.18\pm 0.31)\text{ mg/g}$, V_c 含量为 $(0.42\pm 0.05)\text{ mg/g}$,总酚含量为 $(45.32\pm 0.49)\text{ mg/g}$,与真空冷冻干燥相比,上述几种营养物质分别减少了 28.55% 、 33.33% 和 24.98% ,这说明喷雾干燥会使一些热稳定性较差的成分发生损失,但喷雾干燥过程中,大部分高温热空气的热量都用于水分蒸发,尾气温度一般为 $70\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$,热敏性物质不会长时间承受过高的温度^[29],虽有损失,但仍有大部分能保留下来。两种干燥方式所得蓝靛果果粉的花色苷含量和总酚含量存在显著性差异($P<0.05$)。

2.8.2 果粉的物理特性

分别检测了喷雾干燥和真空冷冻干燥所得蓝靛果果粉的物理特性,结果见表10。

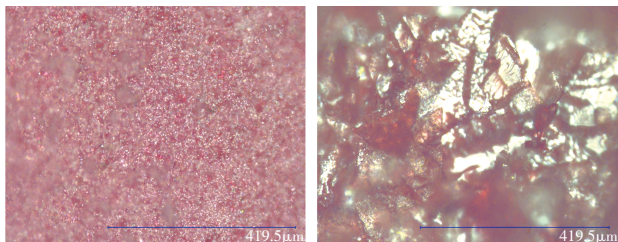
表10 不同干燥方式对蓝靛果果粉物理特性的影响
Table 10 Effects of different drying methods on physical properties of *Lonicera caerulea* fruit powder

干燥方式	水分含量/%	溶解时间/s	流动性/cm	稳定性/%
喷雾干燥	3.01 ± 0.08^b	24.00 ± 0.29^b	11.90 ± 0.15^a	99.40 ± 0.38^a
真空冷冻干燥	6.89 ± 0.14^a	38.00 ± 0.23^a	8.70 ± 0.09^b	93.20 ± 0.43^b

注:同列不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

水分含量是评价果粉质量的重要指标之一,水分含量越低,果粉越不易结块,贮藏性能越好。由表 10 可知,喷雾干燥的脱水效果好,所得果粉的水分含量 $[(3.01\pm 0.08)\%]$ 显著($P<0.05$)低于真空冷冻干燥果粉 $[(6.89\pm 0.14)\%]$ 。

显微镜下两种干燥方式所得蓝靛果果粉的表面结构如图 1 所示。



(a) 喷雾干燥果粉

(b) 真空冷冻干燥果粉

图 1 不同干燥方式所得果粉的表面结构

Fig.1 Surface structure of fruit powder obtained by different drying methods

由于喷雾干燥是先将液态物料雾化后再脱水,观察图 1 显微镜所拍摄的果粉表面结构可以看出,喷雾干燥后的果粉为松散的粉末状态,而真空冷冻干燥后的果粉呈晶片式结构,这也验证了前者的流动性 $[(11.90\pm 0.15)\text{ cm}]$ 要显著($P<0.05$)优于后者 $[(8.70\pm 0.09)\text{ cm}]$ 。

利用激光粒度分析仪测定喷雾干燥和真空冷冻干燥所得蓝靛果果粉的粒度,结果如图 2 所示。

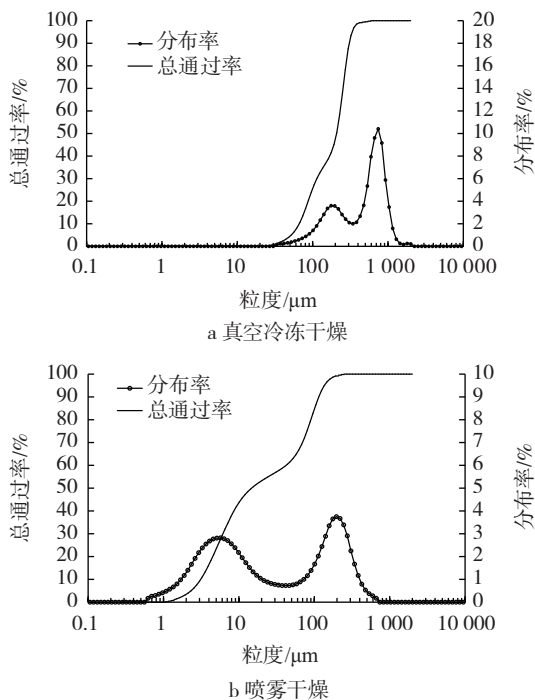


图 2 干燥方式对蓝靛果果粉粒度的影响

Fig.2 Effects of different drying methods on particle size of *Lonicera caerulea* fruit powder

由图 2 可知,喷雾干燥蓝靛果果粉的粒度大小主要集中在 $1\sim 250\text{ }\mu\text{m}$,其中 92.77% 果粉的粒度小于 $100\text{ }\mu\text{m}$,最大粒度是 $248.9\text{ }\mu\text{m}$,真空冷冻干燥果粉的粒度分布为 $25\sim 600\text{ }\mu\text{m}$,主要集中在 $350\text{ }\mu\text{m}$ 左右,最大粒度是 $592\text{ }\mu\text{m}$ 。果粉粒度越小,溶解性能越好,结合表 10 可以看出,喷雾干燥蓝靛果果粉的溶解时间为 $(24.00\pm 0.29)\text{ s}$,比真空冷冻干燥果粉少 14 s,而且溶解、静置 5 d 后,基本没有固形物析出,稳定性可以达到 $(99.40\pm 0.38)\%$ 。

综合对比分析可以得出,喷雾干燥的加工方式会使蓝靛果果粉中的一些热不稳定活性成分含量减少,但所得果粉具有良好的物理特性,水分含量少,粒度小,冲溶性能较好。

3 结论

本研究确定了进风温度、进样速度和进风量是影响蓝靛果果粉喷雾干燥工艺的主要因素,其中进风温度和进样速度的影响极显著($P<0.01$);根据正交试验各因素的优水平确定了蓝靛果果粉喷雾干燥的最佳工艺条件为料液比 $1:4\text{ (g/mL)}$ 、进风温度 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、进样速度 8.4 mL/min 、进风量 $26\text{ m}^3/\text{h}$ 、麦芽糊精添加量 15%。按此条件所得蓝靛果果粉流动性为 $(11.90\pm 0.15)\text{ cm}$,粒度范围在 $1\sim 250\text{ }\mu\text{m}$,92.77% 果粉的粒度小于 $100\text{ }\mu\text{m}$,冲溶性能好,溶解时间为 $(24.00\pm 0.29)\text{ s}$,稳定性为 $(99.40\pm 0.38)\%$,水分含量为 $(3.01\pm 0.08)\%$,花色苷含量为 $(4.18\pm 0.31)\text{ mg/g}$, V_c 含量为 $(0.42\pm 0.05)\text{ mg/g}$,总酚含量为 $(45.32\pm 0.49)\text{ mg/g}$,产品得率为 $(32.19\pm 0.13)\%$ 。

参考文献:

- [1] GERBRANDT E M, BORS R H, CHIBBAR R N, et al. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) vegetative growth cessation and leaf drop phenological adaptation to a temperate climate[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2018, 65(5): 1471-1484.
- [2] SENICA M, STAMPAR F, MIKULIC-PETKOVSEK M. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L. subs. *Edulis*) berry: A rich source of some nutrients and their differences among four different cultivars [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 238: 215-221.
- [3] 李圣桡, 李若萌, 陈博朴, 等. 蓝靛果的营养价值与加工技术研究进展[J]. 农产品加工, 2020(1): 68-73.
LI Shengrao, LI Ruomeng, CHEN Bopu, et al. Research progress on nutritional value and processing technology of blue rime fruit[J]. Farm Products Processing, 2020(1): 68-73.
- [4] 唐敬思, 王红梅, 佟钰, 等. 蓝靛果忍冬花色苷的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 220-224.
TANG Jingsi, WANG Hongmei, TONG Meng, et al. Research progress on anthocyanins of *Lonicera caerulea* L.[J]. Food Research and Development, 2020, 41(16): 220-224.
- [5] KHATTAB R, GHANEM A, BROOKS M S L. Stability of haskap berry (*Lonicera caerulea* L.) anthocyanins at different storage and processing conditions[J]. Journal of Food Research, 2016, 5(6): 67.

- [6] CAPRIOLI G, IANNARELLI R, INNOCENTI M, et al. Blue honey-suckle fruit (*Lonicera caerulea* L.) from eastern Russia: Phenolic composition, nutritional value and biological activities of its polar extracts[J]. Food & Function, 2016, 7(4): 1892–1903.
- [7] 乔锦莉, 秦栋, 郭良川, 等. 蓝果忍冬的生物活性物质及其功效研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 276–284.
- QIAO Jinli, QIN Dong, GUO Liangchuan, et al. Recent progress in bioactive constituents of *Lonicera caerulea* L. fruit and their health benefits[J]. Food Science, 2020, 41(9): 276–284.
- [8] 刘敬华, 王振宇. 精制及高纯度蓝靛果花色苷的抗氧化性及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(19): 87–92.
- LIU Jinghua, WANG Zhenyu. Study on antioxidative activity and stability on the refined and high purity of anthocyanins of *Lonicera edulis*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(19): 87–92.
- [9] ALI S M, OURTH A, CHE C T, et al. Abstract 1592: Anti-cancer evaluation of various solvent extracts of blue honeysuckle berry (*Lonicera caerulea* L.) against prostate cancer cells[J]. Cancer Research, 2017, 77(13): 1592.
- [10] 于伟, 张桂芳, 甄井龙, 等. 蓝靛果花色苷对高脂血症大鼠肝脏内与胆固醇代谢相关基因的作用[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 171–176.
- YU Wei, ZHANG Guifang, ZHEN Jinglong, et al. Effect of *Lonicera caerulea* anthocyan on the role of cholesterol metabolism related genes in the liver of hyperlipidemic rats[J]. Food Science, 2018, 39(17): 171–176.
- [11] WANG M Y, SRINIVASAN M, DASARI S, et al. Antioxidant activity of Yichun blue honeysuckle (YBHS) berry counteracts CCl₄-induced toxicity in liver injury model of mice[J]. Antioxidants, 2017, 6(3): 50.
- [12] LEE Y S, CHO I J, KIM J W, et al. Hepatoprotective effects of blue honeysuckle on CCl₄-induced acute liver damaged mice[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 7(1): 322–338.
- [13] 徐雅琴, 刘柠月, 李大龙, 等. 蓝靛果多糖功能特性、结构及抗糖基化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 8–14.
- XU Yaqin, LIU Ningyue, LI Dalong, et al. Functional properties, structure and anti-glycosylation activity of polysaccharide from blue honeysuckle fruit (*Lonicera caerulea* L.)[J]. Food Science, 2020, 41(2): 8–14.
- [14] 李伟, 郇海燕, 陈杭君, 等. 不同干燥方式对杨梅果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 77–82.
- LI Wei, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Effect of drying methods on quality characteristics of bayberry powder[J]. Food Science, 2017, 38(13): 77–82.
- [15] TONTUL I, TOPUZ A. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 63: 91–102.
- [16] PHISUT N. Spray drying technique of fruit juice powder: Some factors influencing the properties of product[J]. International Food Research Journal, 2012, 19(4): 1297–1306.
- [17] 林炎娟, 周丹蓉, 吴如健, 等. 不同干燥方式对橄榄果粉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 90–97.
- LIN Yanjuan, ZHOU Danrong, WU Rujian, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics of olive powder[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 90–97.
- [18] 柴智慧, 张佳欣, 宋小荣, 等. 喷雾干燥法制备蔗汁桂圆固体饮料的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 96–102.
- CHAI Zhihui, ZHANG Jiaxin, SONG Xiaorong, et al. Study on the spray drying method for preparing the solid beverage of sugar cane juice and Longan[J]. Food Research and Development, 2018, 39(14): 96–102.
- [19] 磨正遵, 商飞飞, 潘中田, 等. 山楂果粉喷雾干燥参数工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 100–105.
- MO Zhengzun, SHANG Feifei, PAN Zhongtian, et al. Study on spray drying parameters of hawthorn fruit powder[J]. Food Research and Development, 2018, 39(4): 100–105.
- [20] 周畅, 周浓, 陈源涛. 真空干燥与真空冷冻干燥对番石榴果粉品质的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(2): 111–117.
- ZHOU Chang, ZHOU Nong, CHEN Yuantao. Effect of vacuum drying and vacuum freeze drying on the quality of guava fruit powder[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(2): 111–117.
- [21] 侯玉茹, 李文生, 杨军军, 等. 真空冷冻干燥法加工草莓粉固体饮料的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 233–236.
- HOU Yuru, LI Wensheng, YANG Junjun, et al. Study on processing technology of strawberry powder solid beverage by vacuum freeze-drying method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(14): 233–236.
- [22] LIM K, MA M, DOLAN K D. Effects of spray drying on antioxidant capacity and anthocyanidin content of blueberry by-products[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(7): 156–164.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of moisture in foods: GB 5009.3—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [24] 唐琳, 李子江, 赵磊, 等. 两种 pH 值法测定玫瑰花花色苷含量的比较[J]. 食品科学, 2009, 30(18): 310–313.
- TANG Lin, LI Zijiang, ZHAO Lei, et al. Comparison of two pH methods for determining anthocyanins from flower petals of rose[J]. Food Science, 2009, 30(18): 310–313.
- [25] 叶群丽. 分光光度法测定水果中维生素 C 的含量[J]. 广东化工, 2016, 43(6): 184–185.
- YE Qunli. Determination of vitamin C content in fruits by spectrophotometry[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(6): 184–185.
- [26] 周浓, 莫日坚, 闫协民, 等. 不同加工工艺对番石榴果粉品质的影响及其褐变的抑制[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(10): 129–134.
- ZHOU Nong, MO Rijian, YAN Xiemin, et al. Effects of different processing technologies on the quality of *Psidium guajava* L. fruit powder and inhibition on its browning[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(10): 129–134.
- [27] 潘芸芸, 陈增鑫, 于嘉慧, 等. 喷雾干燥制备海参肠卵肽粉的工艺条件优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 144–151.
- PAN Yunyun, CHEN Zengxin, YU Jiahui, et al. Optimization of technological conditions for preparing egg peptide powder from sea cucumber intestine using spray drying method[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 144–151.
- [28] 郑虎哲, 崔春兰, 刘梦, 等. 粉末型五味子果醋生产工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 114–121.
- ZHENG Huzhe, CUI Chunlan, LIU Meng, et al. Study on the processing technology of dried *Schisandra chinensis* vinegar powder[J]. Food Research and Development, 2020, 41(5): 114–121.
- [29] 张根生, 韩冰. 食品加工单元操作原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHANG Gensheng, HAN Bing. Principles of food processing unit operations[M]. Beijing: Science Press, 2013.