

不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响

许文静, 陈昌琳, 邓莎, 何贵萍, 李硕, 吕远平

Effects of Different Pretreatment Methods on Quality Characteristics of Freeze-dried Blueberry Powder

XU Wenjing, CHEN Changlin, DENG Sha, HE Guiping, LI Shuo, and L Yuanping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050357>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

响应面优化菠萝蜜果粉真空冷冻干燥工艺

Optimization of vacuum freeze-drying of jackfruit powder by response surface methodology

食品工业科技. 2018, 39(12): 177-184 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.12.031>

真空冷冻干燥南美白对虾干燥模型及品质研究

Drying Model and Quality of *Litopenaeus vannamei* under Vacuum Freeze Drying

食品工业科技. 2019, 40(8): 79-84,144 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.014>

干燥方式对老山芹功能成分及抗氧化性的影响

Effect of Different Drying Methods on Functional Components and Antioxidant Activity of *Heracleum moellendorffii* Hance

食品工业科技. 2021, 42(24): 165-171 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040048>

真空冷冻干燥法制备益生菌粉的冻干保护剂配方优化

Formulation Optimization of Freeze-Drying Protectant for Probiotics Powder by Vacuum Freeze-Drying

食品工业科技. 2021, 42(1): 182-187,196 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020317>

基于低场核磁的紫薯片真空冷冻干燥过程中水分变化

Water Changes of Purple Sweet Potato Slices Using Low-field NMR during Vacuum Freeze Drying

食品工业科技. 2021, 42(7): 9-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050207>

干燥方式对苜蓿超微粉物化特性及抗氧化活性的影响

Effects of Drying Methods on Physical and Chemical Properties and Antioxidant Activity of Alfalfa Superfine Powders

食品工业科技. 2018, 39(13): 84-88,186 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.13.016>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

许文静, 陈昌琳, 邓莎, 等. 不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 89–95. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050357

XU Wenjing, CHEN Changlin, DENG Sha, et al. Effects of Different Pretreatment Methods on Quality Characteristics of Freeze-dried Blueberry Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 89–95. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050357

· 研究与探讨 ·

不同前处理方式对冻干蓝莓粉品质特性的影响

许文静¹, 陈昌琳², 邓莎^{1,3}, 何贵萍^{1,3}, 李硕¹, 吕远平^{1,3,*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065;

2. 四川省农业科学院经济作物育种栽培研究所, 四川成都 610300;

3. 四川大学健康食品科学评价体系研究中心, 四川成都 610065)

摘要: 为探究不同前处理方式(破皮、打浆、过滤)对蓝莓粉品质影响, 利用真空冷冻干燥技术制备蓝莓粉, 测定其物理特性、活性成分及抗氧化能力, 并用傅里叶红外光谱法分析其主要基团。结果显示: 经过不同前处理方式制备的蓝莓粉, 其物理特性及抗氧化能力均有不同。通过红外光谱分析, 三种蓝莓粉的主要基团无明显变化。整果粉分散性好、总酚(5.48 mg/g)和花青素(0.69 mg/g)含量最高、抗氧化能力最强; 果浆粉(PP)水分含量最低(5.47%), 溶解性最高(71.38%); 果汁粉(JP)平均粒径最小(98.62 μm), 玻璃化转变温度最高(43.71 °C)。整果粉(WP)溶解性较低, 但抗氧化能力最强, 可用作生产营养强化剂; 果浆粉(PP)和果汁粉(JP)具有较好的物理特性, 溶解性高, 除了直接食用外, 还可以进行压片加工或作为原料进一步加工固体饮料。三种蓝莓粉各有优势, 可根据实际情况进行选择开发。

关键词: 蓝莓, 果粉, 打浆, 真空冷冻干燥, 抗氧化能力

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)06-0089-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050357

本文网刊:



Effects of Different Pretreatment Methods on Quality Characteristics of Freeze-dried Blueberry Powder

XU Wenjing¹, CHEN Changlin², DENG Sha^{1,3}, HE Guiping^{1,3}, LI Shuo¹, LÜ Yuanping^{1,3,*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Industrial Crop Research Institute-Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610300, China;

3. Healthy Food Evaluation Research Center, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to explore the effects of different pretreatment methods (breaking skin, beating pulp, filtering, etc.) on the quality of blueberry powder, vacuum freeze-drying technology was used to prepare blueberry powder, and its physical properties, active components and antioxidant capacity were determined. Meanwhile, the main groups were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy. The results were as follows: The physical properties and antioxidant capacity of blueberry powder prepared by different pretreatment methods were different. Through infrared spectroscopy, the main groups of the three blueberry powders did not change significantly. The whole fruit powder (WP) had good dispersity and the highest contents of total phenol (5.48 mg/g) and anthocyanin (0.69 mg/g), and the strongest antioxidant capacity. Fruit pulp powder (PP) had the lowest water content (5.47%) and the highest solubility (71.38%). Fruit juice powder (JP) had the lowest average particle size (98.62 μm) and the highest glass transition temperature (43.71 °C). Although WP had lower solubility, it had the strongest antioxidant capacity and could be used for processing nutritional fortifier. PP and JP had good

收稿日期: 2022-05-30

基金项目: 四川特色水果加工关键技术研究及产品开发(2020YFN0149); 蓝莓冷链保鲜与精深加工技术研究(2022YFSY0031)。

作者简介: 许文静(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品工程, E-mail: 1054243824@qq.com。

* 通信作者: 吕远平(1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: 364943477@qq.com。

physical properties and high solubility. Besides direct consumption, they could also be pressed for tablet processing or used as raw materials for further processing of solid drinks. The three kinds of blueberry powder had its own advantages and could be developed according to the actual situation.

Key words: blueberries; fruit powder; beating pulp; vacuum freeze drying; antioxidant capacity

蓝莓(*Vaccinium* spp.)是杜鹃花科越橘属植物,是如今全球公认的一种能促进健康的重要水果,近年来产量和消费量大幅增加。蓝莓营养丰富,富含花青素、多酚、黄酮等天然抗氧化物,具有抗氧化、提高机体免疫、减轻动脉粥样硬化等保健功能^[1]。

蓝莓被誉为浆果之王,但其采摘后的果皮萎蔫迅速,且在运输过程中极易受到机械损伤,加速变质^[2]。目前我国的蓝莓主要以鲜食为主,但其成熟期短,大量成熟鲜果进入冷冻室贮存,贮藏成本高;因此对蓝莓进行产品深加工开发具有重大意义。目前蓝莓深加工产品主要有果酱、果汁、果酒和果粉等。对于蓝莓粉的研究,主要集中于干燥方法的优化或比较不同干燥方法对果粉品质的影响^[3-4],而关于蓝莓前处理方式对果粉品质影响的研究较少。通常蓝莓粉加工的前处理方法分为整颗果实干燥、打浆为果浆后干燥。整颗果实干燥加工蓝莓粉面临水分迁移慢,干燥时间长的问题,但果皮不经过破碎处理可有效地保护活性成分;果浆干燥可加快水分迁移速率,但功能活性成分的保留率有所降低;前处理过程中是否过滤掉果皮果渣等难溶解成分,也与果粉的品质密切相关。因此探究不同前处理方式对蓝莓粉加工品质的影响十分必要。

真空冷冻干燥是在低于食品冻结点温度以下,在真空条件下使固态的冰直接升华为气态的水蒸汽被去除。低温真空的干燥条件具有适当维持产品色泽,减少挥发性成分及热敏性营养成分的损失,保持食品原有形态,复水性好等特点^[5]。因此,本研究选用真空冷冻干燥技术,研究不同的前处理方式对蓝莓粉物理特性、活性成分及抗氧化能力的影响,以期为开发蓝莓冻干粉及蓝莓深加工产品提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蓝莓冻果(品种蓝雨,鲜果采摘后-20 ℃急速冷冻贮藏) 四川省农业科学院经济作物育种栽培研究所;没食子酸、福林酚、盐酸、氯化钾、铁氰化钾、三氯乙酸、过硫酸钾均为分析纯 成都市科隆化学品有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH自由基)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS自由基)均为分析纯 福州飞净生物科技有限公司。

Labmaster-aw STANDARD 型水分活度仪 瑞士 Novasina 公司;CM-5 型色度色差仪 日本柯尼卡美能达;LA960 激光粒度仪 堀场(中国)贸易有限公司;Nicolet Is10 傅里叶红外光谱仪 Thermo Scientific;UV-6000PC 紫外/可见分光光度计 上海

元析仪器有限公司;DSC-60 差式扫描量热仪 日本岛津;FD-1E-50 冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蓝莓粉的制备 通过实验室前期预实验优化,三种蓝莓粉的制备方法如下:

蓝莓整果粉(WP):用不锈钢刀片划破蓝莓冻果表皮,冻果经-80 ℃预冻 4 h 后在-45 ℃、真空度为 6 Pa 下冷冻干燥 48 h,干燥后的样品添加 1.5% 的微晶纤维素后粉碎,过 100 目筛后得到成品。

蓝莓果浆粉(PP):蓝莓冻果经自然解冻后用榨汁机打浆,分别添加果浆重量 2% 阿拉伯胶、与蓝莓果浆可溶性固形物比为 1:1 的麦芽糊精,经过 5000 r/min 均质。均质后的果浆于-80 ℃预冻 4 h 后在-45 ℃、真空度为 6 Pa 下冷冻干燥 48 h,干燥后的样品添加 1.5% 的微晶纤维素后粉碎,过 100 目筛后得到成品。

蓝莓果汁粉(JP):将蓝莓冻果经自然解冻后按蓝莓与水 1:1 混合榨汁,通过双层纱布过滤分离果汁、果渣;过滤后的果渣按料液比 1:10 加入 60% 的乙醇,超声 40 ℃提取花青素 50 min^[6],抽滤,滤液经 40 ℃减压旋转蒸发除去乙醇,得到花青素提取液;经过纱布过滤的果汁与花青素提取液混合后,加入与果汁可溶性固形物含量比为 1:1 的麦芽糊精,果汁重量 2% 的阿拉伯胶,经过 5000 r/min 均质,混合后的果汁-80 ℃预冻 4 h 后在-45 ℃、真空度为 6 Pa 下冷冻干燥 48 h;干燥后的样品添加 1.5% 的微晶纤维素后粉碎,过 100 目筛后得到成品。

1.2.2 蓝莓粉物理特性测定

1.2.2.1 水分含量 采用 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》第一法直接干燥法测定。

1.2.2.2 水分活度 采用水分活度测定仪测定。

1.2.2.3 容重 果粉单位体积质量,将蓝莓粉加入量筒直到 1 mL 时,测定蓝莓粉的质量即容重^[7]。

1.2.2.4 休止角 θ 将漏斗固定于坐标纸上方 8 cm 高度,从漏斗中添加 20 g 蓝莓果粉直至形成圆锥形,测定果粉堆积圆锥的半径 r 和圆锥高度 h ,计算休止角: $\tan\theta = h/r$ ^[8]。

1.2.2.5 溶解性 称取 1 g 果粉于烧杯中并加入 100 mL 的蒸馏水,高速搅拌 5 min 后以 3000 r/min 离心 5 min,取上清液 25 mL 于 105 ℃烘箱中烘干至恒重,计算上清液中干物质含量所占的比例^[9]。

1.2.2.6 分散性 将 1 g 果粉撒布于 25 mL 的水面上,于恒温磁力搅拌器上记录从搅拌开始到果粉结

块组织全部分散所需的时间^[10]。

1.2.2.7 粒径分析 用乙醇作为分散介质^[11], 采用激光粒度仪测定^[12]。

1.2.2.8 玻璃化转变温度(T_g) 依照张佳佳等^[13]的方法并稍作修改, 称取 8 mg 左右的粉末样品在 0~200 °C 的氮气下加热, 升温速率为 10 °C/min。DSC 以钢为标准品进行校准, 并以空铝锅(51 mg)为基准进行测量。

1.2.2.9 色泽 利用色度色差仪测定蓝莓粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 并计算其饱和度(c^*)及色调角(h)^[14]。

1.2.3 蓝莓粉活性成分及体外抗氧化能力测定

1.2.3.1 总酚含量 采用福林酚法测定^[15], 即蓝莓粉经过乙醇提取总酚后, 取 1 mL 提取液于 10 mL 容量瓶中, 分别加入 1 mL 福林酚试剂、3 mL 7.5% Na_2CO_3 后定容, 避光显色 1 h 后测定 760 nm 吸光度值, 以没食子酸为标准品, 结果以没食子酸当量表示。

1.2.3.2 花青素含量 采用 pH 示差法^[16] 测定, 即蓝莓粉经过甲醇提取花青素后, 分别取 1 mL 提取液于 2 支 25 mL 比色管中, 用 pH 为 1.0 和 4.5 的缓冲溶液定容至 10 mL, 在 40 °C 水浴锅中平衡 50 min 后测定 510 和 700 nm 吸光度值计算花青素含量, 以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计。

1.2.3.3 体外抗氧化能力 样品提取液的制备参考张秀玲等^[17]的方法, 即取适量蓝莓粉, 按料液比 1:30 加入 70% 乙醇, 超声提取 30 min 后抽滤, 滤液 4 °C 保存待测, 样品体外抗氧化能力根据 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率、铁还原能力分析^[18]。

DPPH 自由基清除能力: 配制 0.2 mmol/L DPPH 溶液, 避光保存。吸取 0.5 mL 提取液+0.5 mL DPPH 溶液、0.5 mL 乙醇+0.5 mL DPPH 溶液, 避光反应 30 min 后在 517 nm 测定其吸光度, 分别记为 A_1 、 A_2 , DPPH 自由基清除率=[(A_2-A_1)/ A_2]×100。配制 5、7.5、10、20、40、60 μ g/mL 抗坏血酸溶液做阳性对照, DPPH 自由基清除率最终结果由抗坏血酸当量表示, mg AEE/g DW。

ABTS⁺自由基清除能力: 将 7.4 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液 1:1 混匀, 室温下避光反应 12 h。使用前将混合液用水稀释至吸光度为 0.700±0.005(734 nm)得 ABTS 工作液。吸取 0.5 mL 提取液+0.95 mL ABTS 工作液; 0.5 mL 乙醇+0.95 mL ABTS 工作液; 避光反应 15 min 后在 734 nm 测定其吸光度, 分别记为 A_1 、 A_2 , ABTS⁺自由基清除率=[(A_2-A_1)/ A_2]×100。配制 5、7.5、10、20、40、60 μ g/mL 抗坏血酸溶液做阳性对照, ABTS⁺自由基清除率最终结果由抗坏血酸当量表示, mg AEE/g DW。

铁还原能力: 吸取 2.5 mL 提取液、2.5 mL PBS 缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.6)、2.5 mL 铁氰化钾溶液(1%)于试管内, 50 °C 水浴 20 min, 迅速冷却后加入 2.5 mL 三氯乙酸(10%), 3000 r/min 离心 10 min, 上

清液待测。取上清液 2.5 mL、纯水 2.5 mL、氯化铁(0.1%)2.5 mL 混合, 测定 700 nm 吸光度值。配制 5、7.5、10、20、40、60 μ g/mL 抗坏血酸溶液做阳性对照, 铁还原能力最终结果由抗坏血酸当量表示, mg AEE/g DW。

1.2.4 红外光谱测定 利用傅里叶红外光谱仪, 采用溴化钾压片法, 其中果粉: 溴化钾为 1:100 混合后于玛瑙研钵中充分研磨后压片, 随后取出样品片置于傅里叶红外光谱仪上扫描。光谱扫描范围 4000~400 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 累计扫描 16 次, 扫描时自动扣除 H_2O 和 CO_2 的干扰。

1.3 数据处理

所有数据以平均值±标准差表示, 采用 SPSS 26 软件对数据进行 Duncan's 差异显著性分析, $P<0.05$ 时显著; 通过 SPSS 26 软件进行皮尔逊相关性分析; 采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同前处理方式对蓝莓粉物理特性的影响

不同前处理方式对蓝莓粉的物理性质影响见表 1。整果粉(WP)水分含量为 10.88%, 比果浆粉(PP)和果汁粉(JP)水分含量分别高 49.72% 和 49.45%。WP 水分活度最大(0.30), 与 PP、JP 有显著差异($P<0.05$)。整果粉由于加工前果皮的影响, 水分较难从内部迁移出果实表面, 干燥缓慢。

表 1 蓝莓粉物理特性结果

Table 1 Results of physical characteristics of blueberry powder

物理特性	蓝莓粉		
	PP	WP	JP
水分含量(%)	5.47±0.25 ^b	10.88±0.52 ^a	5.50±0.40 ^b
水分活度	0.24±0.01 ^b	0.30±0.01 ^a	0.21±0.01 ^c
容重(g/mL)	0.35±0.02 ^b	0.28±0.01 ^c	0.40±0.01 ^a
分散性(s)	64.33±3.51 ^b	76.00±2.00 ^a	61.33±1.53 ^b
休止角θ(°)	38.41±0.36 ^b	42.58±0.35 ^a	36.04±0.55 ^c
溶解性(%)	71.38±2.33 ^a	53.87±2.34 ^b	65.99±2.33 ^c
平均粒径(μm)	129.82±1.29 ^b	149.00±4.70 ^a	98.62±0.80 ^c
玻璃化转变温度(°C)	40.02±1.19 ^b	35.83±0.56 ^c	43.71±1.01 ^a

注: 同行肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 表 3~表 4 同。

容重表示果粉的单位体积质量, 也可以反映果粉的运输成本^[19]。容重最低的为 WP(0.28 g/mL)。不考虑营养功能方面, 容重越大, 其包装和运输成本相对越低。JP 和 PP 两种蓝莓粉容重高于 WP, 可能是前期均质处理减少了果浆中的气体, 使其在冷冻干燥时变得相对致密。同时 WP 的分散性最高, 为 76.00 s, 这与 WP 的容重较低有一定关联。因为较低的容重可反映其结构疏松多孔, 颗粒间隙大, 在水中与水分子接触面更多, 分散性更强^[20]。

休止角反映果粉的流动性, 休止角越小, 粉体流动性越好。整果粉休止角最大, 为 42.58°; 果汁粉休止角最小, 为 36.04°, 三种蓝莓粉流动性差异显著($P<0.05$)。JP 中不含果皮和果渣, 且经过了均质处

理, 粉质更为细腻, 休止角最小, 流动性最好。休止角小于40°有较好的流动性, 可满足果粉运输及工业自动化生产的需要^[21]。在溶解性方面, PP和JP溶解性均高于WP, 因为整果粉中含有果胶和纤维素等不溶性成分, 且PP和JP干燥前经过均质处理使得原料细化, 因此溶解性高于WP。

关于平均粒径, JP平均粒径最小(98.62 μm), WP平均粒径最大(149 μm), 且容重最低。因为粒径大小在一定程度上与粉体的容重相关, 粉体的平均粒径越大, 颗粒间的空隙空气含量就越多, 因此所占的体积就越大, 从而导致容重更低^[22]。

玻璃化转变温度常用于表征食品粉末的粘性和内聚行为, 粉末暴露在高于玻璃化转变温度时会导致粘性和结块问题^[23]; 食品处于或低于其玻璃化转变温度时贮藏稳定性最高; PP、JP的玻璃化转变温度分别为43.71、40.02 °C, 高于WP(35.83 °C), 可能是由于加入了麦芽糊精和阿拉伯胶等保护剂与原料中糖等有机化合物形成稳定的络合物, 提高了蓝莓粉的玻璃态转化温度, 从而降低粉末吸湿性, 使得产品不易聚集抱团。

对蓝莓粉物理特性指标进行相关性分析, 结果见表2。水分含量与水分活度间呈显著($P<0.05$)正相关, 相关系数达0.940。容重与分散性、休止角、玻璃化转变温度呈显著($P<0.05$)负相关, 粉体容重越大, 其粉体结构越致密, 颗粒间隙小, 与水及空气接触面小, 分散性弱, 玻璃化转变温度低。分散性与休止角呈显著($P<0.05$)正相关, 相关系数为0.921, 与溶解性之间呈显著($P<0.05$)负相关, 相关系数为-0.817。分散性好, 颗粒间流动性强, 在水中与水分子接触表面积更大, 溶解性好。从表2可见蓝莓粉绝大部分物理特性指标之间有较好相关性, 对蓝莓粉的品质是受到水分含量、容重、分散性、溶解性玻璃化转变温度等多方面因素相互影响的。

三种蓝莓粉的粒径分布见下图1。JP的粒径范围为8.82~344.20 μm; PP的粒径范围为8.82~451.55 μm; WP的粒径范围为8.82~517.20 μm。WP在174.616 μm左右出现了频度峰值, 呈现单峰态及较窄的粒径分布, JP、PP分别在88.58、101.46 μm附近出现最高频

度峰。添加了麦芽糊精和阿拉伯胶的冻干蓝莓粉(PP、WP)粒径分布呈现出双峰型, 小颗粒可以渗透到大颗粒之间的空隙中, 占据空间小, 这与Cristhiane等^[24]的研究相似。产生双峰型的原因可能是添加了麦芽糊精和阿拉伯胶等载体, 使得较小的颗粒之间形成桥梁从而团聚成更大的颗粒。

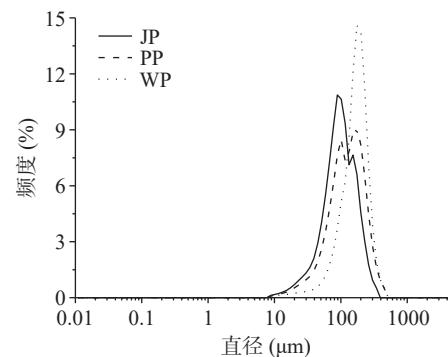


图1 蓝莓粉粒径分布图
Fig.1 Size distribution map of blueberry powder

由表3可知, 样品的 L^* 值表示样明暗度, a^* 值表示红绿度, b^* 值表示黄蓝度^[25]。蓝莓粉 L^* 值最高的为JP, 达29.23, 表示其明亮度高, 这从图2中也可以直观看出; L^* 值PP最低, 为23.78。由图2可以看出, 三种蓝莓粉的红度为JP>WP>PP, 这与表3中三种蓝莓粉 a^* 值大小排序相符; b^* 值最大的为WP。色调角 h 可以反映果粉的颜色, 若 $h=0^\circ$ 表示红色; $h=90^\circ$ 表示黄色; $h=180^\circ$ 表示绿色; 而 $h=270^\circ$ 为蓝色^[26]。三种蓝莓粉的 h 均小于90°, 即都呈现红色; JP的饱和度 c^* 最大(20.05), 色调角 h 最低, 颜色呈现高饱和的红紫色。JP、WP的色泽参数均高于PP, 可能是由于JP舍弃果皮但加入了果皮提取后的花青素, 对色泽贡献大; WP中含有更多未被破坏的纤维素、果胶等物质, 对色泽可能起到了增色的作用。

2.2 不同前处理方式对蓝莓粉活性成分及抗氧化能力的影响

蓝莓粉活性成分及抗氧化能力见表4。WP的总酚含量最高, 达5.48 mg/g, WP冻干过程中仅划破蓝莓冻果表皮而未破碎, 因而较为完整的果皮包被对蓝莓总酚和花青素等起到了保护作用。PP的总酚和

表2 蓝莓粉物理特性相关性表
Table 2 Correlation table of physical properties of blueberry powder

参数	水分含量	水分活度	容重	分散性	休止角	溶解性	平均粒径	玻璃化转变温度
水分含量	1							
水分活度	0.940**	1						
容重	-0.883**	-0.963**	1					
分散性	0.951**	0.923**	-0.934**	1				
休止角	0.908**	0.987**	-0.979**	0.921**	1			
溶解性	-0.915**	-0.801**	0.684*	-0.817**	-0.757*	1		
平均粒径	0.772*	0.922**	-0.974**	0.853**	0.950**	-0.568	1	
玻璃化转变温度	0.840**	0.918**	-0.974**	0.915**	0.936**	-0.590	0.951**	1

注: “*”表示在0.05级别(双尾), 相关性显著; “**”表示在0.01级别(双尾), 相关性显著。

表 3 蓝莓粉色度参数表
Table 3 Color parameter table of blueberry powder

物理特性	蓝莓粉		
	PP	WP	JP
L^*	23.78±0.02 ^c	28.70±0.01 ^b	29.23±0.01 ^a
a^*	15.05±0.04 ^c	17.65±0.01 ^b	19.99±0.03 ^a
b^*	3.34±0.40 ^b	5.32±0.30 ^a	1.60±0.40 ^c
c^*	15.41±0.04 ^c	18.44±0.20 ^b	20.05±0.30 ^a
$h(^{\circ})$	12.49±0.16 ^b	16.76±0.07 ^a	4.58±0.10 ^c

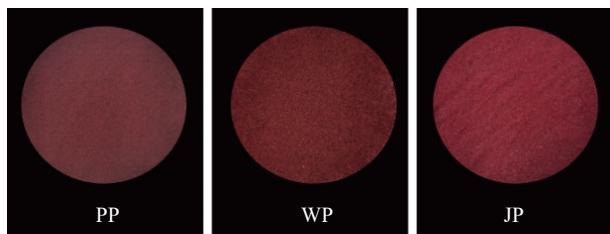


图 2 蓝莓粉成品图片

Fig.2 Picture of blueberry powder

花青素含量与 WP 相近, 无显著差异 ($P>0.05$)。果浆粉 (PP) 与整果粉 (WP) 都含有果皮和果渣, 但 PP 还添加了麦芽糊精、阿拉伯胶等冻干保护剂, 相同质量蓝莓粉中 PP 的蓝莓原料占比低于 WP, 但两者总酚含量及花青素含量无显著差异。这可能是因为加入的冻干保护剂有一定包埋作用, 对容易氧化的酚类、花青素等物质起到了保护的作用。

表 4 蓝莓粉活性成分及抗氧化能力

Table 4 Active components and antioxidant capacity of blueberry powder

指标	蓝莓粉		
	PP	WP	JP
总酚(mg/g)	5.29±0.12 ^a	5.48±0.46 ^a	4.60±0.17 ^b
花青素(mg/g)	0.70±0.03 ^a	0.69±0.07 ^a	0.58±0.03 ^b
DPPH自由基清除率(mg/g)	12.88±0.48 ^b	15.79±0.20 ^a	11.44±0.20 ^c
ABTS ⁺ 自由基清除率(mg/g)	18.54±2.09 ^b	21.31±0.28 ^a	16.28±0.42 ^b
铁离子还原能力(mg/g)	17.25±0.08 ^{ab}	18.23±1.99 ^a	14.95±0.56 ^b

蓝莓的果皮和果渣中含有丰富的花青素, 而 JP 中不含果皮果渣, 虽然采用溶剂法对花青素进行提取回填, 但由于提取不完全且提取过程中损耗等原因, JP 的总酚 (4.60 mg/g) 和花青素含量最低 (0.58 mg/g)。但含量仅低于 PP、WP 的 13% 左右, 冻干保护剂对花青素还是起到了一定的包埋、保护作用。

WP 的 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率、铁离子还原能力最高, 分别为 15.79、21.31、18.23 mg/g。抗氧化能力的强弱与蓝莓粉总酚、花青素等活性成分含量一致。

2.3 红外光谱

通过傅里叶红外光谱分析有机官能团的变化。由图 3 可知, 蓝莓粉的红外光谱主要有 5 个主峰, 分别在 3384、2930、1727、1640、1030 cm⁻¹ 处。3384 cm⁻¹ 这一宽频吸收带一般为-OH(缔合)伸缩振动, 可能与

酚类、有机酸有关。在 2930 cm⁻¹ 处的峰与蛋白质和多糖中 C-H 基团的反对称伸缩有关^[27]; 在 1727 cm⁻¹ 处由于 C=O 伸缩引起强烈的吸收。三种蓝莓粉均在 1640 cm⁻¹ 左右表现出特征波长, 这与蓝莓花青素芳环中 C=C 基团的伸缩有关^[28]。同时, 三个样品在 1100~776 cm⁻¹ 的光谱区域都表现出吸收, 在 1030 cm⁻¹ 处强吸收, 这主要对应蓝莓中糖和酸 C-O 基团强伸展振动^[29], 说明三种蓝莓粉中含有糖和酸。在 895 cm⁻¹ 处的吸收是由 β -糖苷键引起的, 有研究指出在红外图谱中, α 型 C-H 键通常在 844 cm⁻¹ 附近出现吸收带, β 型 C-H 键通常在 891 cm⁻¹ 附近出现吸收带^[30]。而蓝莓粉在 844 cm⁻¹ 附近无吸收带, 表明糖基是由 β -糖苷键连接的。图 3 显示三种蓝莓粉红外光谱相似, 吸收峰的位置相同, 经过不同前处理冻干的蓝莓粉主要基团未发生明显变化, 即三种蓝莓粉主要成分未发生明显变化^[31~32]。

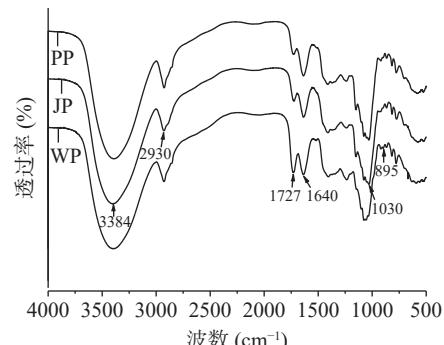


图 3 蓝莓粉红外光谱

Fig.3 Fourier transform infrared spectroscopy of blueberry powder

3 结论

研究不同前处理方式对冷冻干燥蓝莓粉品质的影响, 得出如下结论。WP 的花青素和总酚含量分别为 0.69 和 5.48 mg/g, 高于 JP、PP, 抗氧化能力最强, 可以用于加工营养强化剂类产品; 但水分含量较高、玻璃化转变温度低, 在工业生产中需严格控制环境湿度。PP、JP 具有水分含量低 (<6%), 休止角 <40°, 果粉流动性好, 玻璃化转变温度高, 色泽好等物理特性, 同时具有较强抗氧化能力。JP 平均粒径小, 色泽呈现红紫色, 可以单独食用或原料进行进一步加工; PP 溶解性高, 分散性好, 可以作为速溶粉进行生产开发。WP、PP、JP 三种蓝莓粉都具有工业化生产的潜力, 可以根据生产实际来选择开发; 后续还可以针对麦芽糊精、阿拉伯胶等保护剂深入研究其干燥过程中对果粉的保护作用以及以果粉为原料的新型产品开发。

参考文献

- [1] FALLAH A A, SARMAST E, JAFARI T. Effect of dietary anthocyanins on biomarkers of glycemic control and glucose metabolism: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109379.

- [2] XU F, LIU S, LIU Y, et al. Effect of mechanical vibration on postharvest quality and volatile compounds of blueberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129216.
- [3] 王科堂, 陈雪峰, 陈梦音, 等. 干燥方式对猕猴桃果粉品质及抗氧化性的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(5): 120–126. [WANG Ketang, CHEN Xuefeng, CHEN Mengyin, et al. Effects of drying methods on the quality and antioxidant properties of kiwi fruit powder[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(5): 120–126.]
- [4] SONIKA P, AMRITA P, SUMAN R. Optimization of spray drying conditions for the production of quality ber (*Zizyphus mauritiana* Lamk.) fruit powder[J]. *Nutrition and Food Science*, 2019, 49(6): 1088–1098.
- [5] JOSÉ A P, MARÍA I F, JUAN T, et al. Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze drying and fluid bed[J]. *Powder Technology*, 2019, 347: 179–185.
- [6] LI X, ZHU F, ZENG Z. Effects of different extraction methods on antioxidant properties of blueberry anthocyanins[J]. *Open Chemistry*, 2021, 19(1): 138–148.
- [7] 李珂昕, 蔡敬民, 胡勇, 等. 干燥方法对蓝莓果粉品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2019, 48(6): 98–102. [LI Kexin, CAI Jingmin, HU Yong, et al. Effects of different drying methods on quality of blueberry fruit powder[J]. *South China Fruits*, 2019, 48(6): 98–102.]
- [8] 李伟, 鄢海燕, 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.]
- [9] 王晓燕, 张文琴, 赵红革. 黄刺玫果粉喷雾干燥工艺优化及物性检测[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(13): 212–217. [WANG Xiaoyan, ZHANG Wenqin, ZHAO Hongge. Optimization of spray drying technology and physical properties detection of rose xanthina lindl fruit powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(13): 212–217.]
- [10] 李国鹏, 祝婉炽, 陈倩欣, 等. 不同番石榴品种果粉功能特性差异比较[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(19): 124–127. [LI guopeng, ZHU Wanchi, CHEN Qianxin, et al. Comparison on the properties of fruit powder of different guava cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(19): 124–127.]
- [11] MARTA F Z, VANESSA M D S, ANGELISE D, et al. Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying[J]. *Powder Technology*, 2017, 305: 447–454.
- [12] TATAR T F, CENGIZ A, KAHYAOGLU T. Evaluation of ultrasonic nozzle with spray-drying as a novel method for the microencapsulation of blueberry's bioactive compounds[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 32: 136–145.
- [13] 张佳佳, 陈小兰, 夏宁, 等. 赋形剂对冻干西番莲果粉理化特性及抗氧化活性的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(7): 199–204. [ZHANG Jiajia, CHEN Xiaolan, XIA Ning, et al. Effects of excipients on the physicochemical properties and antioxidant activity of freeze-dried passion fruit powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(7): 199–204.]
- [14] 纪淑娟, 周倩, 马超, 等. 1-MCP 处理对蓝莓常温货架品质变化的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 322–327. [JI Shujuan, ZHOU Qian, MA Chao, et al. Effect of 1-MCP treatment on quality changes of blueberry at room temperature[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 322–327.]
- [15] WU Y, XU L, LIU X, et al. Effect of thermosonication treatment on blueberry juice quality: Total phenolics, flavonoids, anthocyanin, and antioxidant activity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112–123.
- [16] YUMI F, MIYA K, AIRI I, et al. Anthocyanins in perilla plants and dried leaves[J]. *Phytochemistry*, 2018, 147: 158–166.
- [17] 张秀玲, 李晨, 汲润, 等. 不同保护剂对蓝靛果冻干粉理化和花色苷缓释特性的影响[J]. *食品科学*, 2021(16): 1–12. [ZHANG Xiuling, LI Chen, JI Run, et al. Effects of different protective agents on the physicochemical and anthocyanin sustained-release properties of freeze-dried powder of *Lonicera edulis*[J]. *Food Science*, 2021(16): 1–12.]
- [18] ZIA M P, ALIBAS I. Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and *in vitro* bioaccessibility of blueberry fruits[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101179.
- [19] LIU Z, ZHANG M, WANG Y. Drying of restructured chips made from the old stalks of *Asparagus officinalis*: impact of different drying methods[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(8): 2815–2824.
- [20] PUI L P, KARIM R, YUSOF Y A, et al. Effects of inlet temperature and carrier concentration on spray-dried 'cempedak' (*Artocarpus integer*) fruit powder and its reconstitution properties[J]. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 2021, 20(2): 135–148.
- [21] 刘洋洋, 龚霄, 刘义军, 等. 不同加工方式对火龙果果粉理化特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(9): 2689–2695. [LIU Yangyang, GONG Xiao, LIU Yijun, et al. Effect of different preparation methods on properties of pitaya fruit powder[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(9): 2689–2695.]
- [22] GOULA A M, ADAMOPOULOS K G. A new technique for spray drying orange juice concentrate[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(2): 342–351.
- [23] KAPOOR R, FENG H. Characterization of physicochemical, packing and microstructural properties of beet, blueberry, carrot and cranberry powders: The effect of drying methods[J]. *Powder Technology*, 2022, 395: 290–300.
- [24] CRISTHIANE C F, SILVIA P M G, IZABELA D A, et al. Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(6): 1237–1245.
- [25] 纪滨, 许正华, 胡学钢, 等. 基于颜色的食品品质检测技术现状及展望[J]. *食品与机械*, 2013, 29(4): 229–232. [JI Bin, XU Zhenghua, HU Xuegang, et al. Reviewing food quality detection technology based on color[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(4): 229–232.]
- [26] 刘洋洋, 陈倩欣, 祝婉炽, 等. 不同果肉类型火龙果果粉功能特性差异比较[J]. *食品科技*, 2015, 40(7): 68–72. [LIU Yangyang, CHEN Qianxin, ZHU Wanchi, et al. The difference of properties between two kinds of pitaya powder[J]. *Food Science and Technolo-*

- gy, 2015, 40(7): 68–72.]
- [27] SHAO P, ZHANG J, FANG Z, et al. Complexing of chlorogenic acid with β -cyclodextrins: Inclusion effects, antioxidative properties and potential application in grape juice[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41: 132–139.
- [28] YANG T, PING W, JIANDONG W, et al. Combining various wall materials for encapsulation of blueberry anthocyanin extracts: Optimization by artificial neural network and genetic algorithm and a comprehensive analysis of anthocyanin powder properties[J]. *Powder Technology*, 2017, 311: 77–87.
- [29] VOLNEI B D S, MARCELO T, JULIO C D C B, et al. Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification byproducts of the Bordo grape (*Vitis labrusca*)[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2015, 93: 39–50.
- [30] XIAO W, MEIYING H, FAN Y, et al. Rapeseed polysaccharides as prebiotics on growth and acidifying activity of probiotics *in vitro*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 232–240.
- [31] 赵广河, 张名位, 张瑞芬, 等. 气流超微粉碎对桃金娘果粉物理化学性质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(1): 17–21. [ZHAO Guanghe, ZHANG Mingwei, ZHANG Ruifen, et al. Effect of airflow ultrafine grinding on physicochemical properties of rhodomyrtus tomentosa fruit power[J]. *Food Science*, 2016, 37(1): 17–21.]
- [32] 杨瑞丽, 陈韵文, 廖镇宇, 等. 微粉化对天麻(*Gastrodia elata* Bl.)粉理化性质和吸收的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(12): 153–157. [YANG Ruili, CHEN Yunwen, LIAO Zhenyu, et al. Effect of micronization on the physicochemical properties and *in vivo* absorption of *Gastrodia elata* Bl. powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(12): 153–157.]