

赋形剂对冻干西番莲果粉理化特性及抗氧化活性的影响

张佳佳, 陈小兰, 夏宁, 滕建文, 黄丽, 韦保耀

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 针对西番莲果浆在真空冷冻干燥过程中物料营养物质损失及终产品易吸湿潮解等技术难点, 通过添加赋形剂麦芽糊精(MD)、阿拉伯胶(AG)、乳清分离蛋白(WPI)和大豆分离蛋白(SPI), 研究西番莲果粉在制备过程中吸湿性、水分含量、维生素 C 保留率、DPPH 自由基清除率的变化规律, 并对果粉的玻璃化转变温度和形貌特点进行分析。研究表明, 添加麦芽糊精使得果粉的玻璃化转变温度从 62.30 °C 增加到 89.87 °C, 并有效降低其吸湿性至 10.69%; 添加阿拉伯胶 (15%) 可以有效降低果粉终产品的水分含量, 从 4.15% 降低至 1.56%; 而添加乳清分离蛋白使得果粉的维生素 C 保留率由 54.16% 提高至 91.85%, DPPH 自由基清除率由 36.81% 提高至 61.89%。添加赋形剂有助于西番莲果浆在冻干过程中保持疏松多孔结构, 且在果粉的表面可能形成类似包覆层的保护膜或类似微胶囊的包埋结构, 防止果粉中的糖类结块粘连, 保护产品的品质。

关键词: 西番莲; 赋形剂; 理化特性; 微观结构; 品质

文章编号: 1673-9078(2017)7-199-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.7.029

Effects of Excipients on the Physicochemical Properties and Antioxidant Activity of Freeze-dried Passion Fruit Powder

ZHANG Jia-jia, CHEN Xiao-lan, XIA Ning, TENG Jian-wen, HUANG Li, WEI Bao-yao

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: During the vacuum freeze-drying of passion fruit pulp, the technical difficulties faced include nutrient loss and that the end products easily become hygroscopic and deliquescent. In order to solve the aforementioned issues, the changes in the pattern of hygroscopicity, moisture content, vitamin C retention rate, and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity of the fruit powder, in the process of preparation, were studied by adding excipients-maltodextrin (MD), gum Arabic (AG), whey protein isolate (WPI), and soy protein isolates (SPI). Additionally, the glass transition temperature and morphological characteristics of the fruit powder were analyzed. The results showed that the addition of maltodextrin increased the glass transition temperature of fruit powder from 62.30 to 89.87 °C, and effectively decreased its hygroscopicity to 10.69%. The addition of gum Arabic (15%) could effectively reduce the moisture content of the final product of fruit powder from 4.15 to 1.56% and increase the retention rate of vitamin C of fruit powder from 54.16 to 91.85%. And its DPPH radical scavenging rate was increased from 36.81 to 61.89% by the addition of whey protein isolate. The addition of excipients could help to maintain the porous structure of passion fruit pulp during the process of freeze-drying. Furthermore, a protective film similar to the cladding layer or an embedding structure similar to microcapsules were formed on the surface of the fruit powder to prevent the sticking and agglomeration of the carbohydrates in fruit powder, thereby protecting the quality of the product.

Key words: passion fruit; excipient; physicochemical properties; microstructure; quality

西番莲 (*Passion fruit*), 也可称为百香果、巴西果或鸡蛋果, 属于西番莲科 (*Passifloraceae*) 西番莲

收稿日期: 2016-12-17

基金项目: 公益性行业农业科研专项经费项目 (201303077-4-1); 广西科技攻关项目 (桂科能 15122001-3-7)

作者简介: 张佳佳 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 夏宁 (1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食油脂植物蛋白工程

属 (*Passiflorim*), 是热带和亚热带多年生草质或木质常青藤本攀缘植物, 主产地为巴西、澳大利亚、美国夏威夷及佛罗里达州、肯尼亚等。巴西是世界上最大的西番莲生产国, 每年生产约 40 万 t 果^[1]。西番莲具有菠萝、柠檬、香蕉、草莓和芒果等一百多种水果的浓郁香味, 享有“饮料之王”和“饮料味精”之美誉。目前, 西番莲果汁产品在国际饮料市场上的需求量以每年 15%~20% 的速度在增长, 呈现供不应求的趋势^[2]。

然而,西番莲果实的保质期较短,室温条件下7~10 d内果皮会出现失水褶皱现象,在温度6.5℃、湿度85%~90%的条件下储存期仅为4~5周^[3]。浓缩果汁、原果汁是西番莲果浆主要的产品形式,而将新鲜的西番莲果浆脱水加工成粉末,可以用于生产速溶西番莲果汁粉,也可以作为调味剂添加到冰淇淋、酸奶等产品中。西番莲果汁粉具有水分含量低、保质期长、所占空间小以及成本低等优势,随着食品工业现代化发展的需要崭露头角。

西番莲果浆的色泽鲜艳,富含多种维生素、矿物质和氨基酸,其可溶性固形物约13.5%~17.5%,pH约2.93~3.30,是高糖高酸型果汁的典型代表。西番莲果浆中含有大量的小分子糖(葡萄糖、果糖和蔗糖等)和有机酸(柠檬酸、苹果酸和丙二酸等),在真空冷冻干燥过程中这些玻璃化转变温度较低的小分子物质会导致物料存在营养物质损失及终产品易吸湿潮解等技术难点,极大地限制了西番莲果粉的生产和发展。本文主要针对西番莲果浆在真空冷冻干燥过程中物料营养物质损失及终产品易吸湿潮解等技术难点,研究添加不同含量的麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白和大豆分离蛋白对西番莲果粉吸湿性、水分含量、维生素C保留率、DPPH自由基清除率、溶解性、玻璃化转变温度和形貌特点的影响,为赋形剂在高糖高酸果汁类粉末中的应用生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

紫果西番莲,广西香果人家农业有限公司,产地为广西南宁市;麦芽糊精(DE10),徐州市远航食品添加剂有限公司;阿拉伯胶(98%),泰安市凯通有限公司;乳清分离蛋白(90%),新西兰恒天集团;大豆分离蛋白(92%),上海娇源实业有限公司;2,6-二氯酚、碳酸氢钠、抗坏血酸、草酸、高岭土、DPPH(1,1-Diphenyl-2-picryl-hyd-razyl)、无水乙醇等,均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

阿贝折光仪,上海圣科仪器设备有限公司;高速组织捣碎机,上海比朗仪器有限公司;JDG-0.2真空冷冻干燥机,兰州科近真空冻干技术有限公司;差示扫描量热仪,德国耐驰公司;UV-1601PC紫外可见分光光度计,日本岛津公司;电磁加热搅拌器,江苏协易机床有限公司;S-3400N扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.3 工艺流程

紫果西番莲→选果→去皮取浆→分离果籽→过滤→测定果浆的固形物含量→添加赋形剂(按果粉固形物含量计算)→均质混匀→真空冷冻干燥(预冻温度-45℃,真空度约65 Pa,升华温度45℃,解析温度55℃)→粉碎→铝箔袋包装→阴凉干燥处保存。

1.4 试验方法

1.4.1 总可溶性固形物含量

精确称取20 g(精确至0.001 g)西番莲果汁于恒重称量皿,在105℃的烘箱中烘干至恒重^[4],三次平行,计算出西番莲果汁总固形物的含量。计算公式为:

$$\text{总固形物含量}(\%) = W_2/W_1 \times 100$$

式中: W_1 表示样品的质量, g; W_2 表示干燥后样品的质量, g。

1.4.2 玻璃化转变温度和吸湿性

果粉玻璃化转变温度的测定。精确称取5.00±0.50 mg样品置于耐驰铝坩埚中,以空铝坩埚为空白,平行三次。差示扫描量热仪测定参数设置为N₂流量50 mL/min,扫描温度0~180℃,升温速率10℃/min^[5,6]。

果粉吸湿性的测定。精确称取约1 g(精确至0.001 g)样品均匀分布于恒重的称量皿中,置于密闭容器(温度25℃,NaCl饱和溶液相对湿度65%),放置24 h后称量^[7,8]。计算公式为:

$$\text{吸湿性}(\%) = [m/(m_1+m_2)]/(1+m/m_1)$$

式中: m 表示吸湿后样品增加的质量; m_1 表示样品的质量; m_2 表示样品的水分含量。

1.4.3 水分含量

果粉水分含量的测定方法参照GB 50093-2010^[9]。

1.4.4 抗氧化活性

1.4.4.1 维生素C保留率

果粉维生素C保留率的测定参考GB 6195-1986^[10]。计算公式^[11]为:

$$\text{维生素C保留率}(\%) = [V_2/(1-X_2)]/[V_1/(1-X_1)] \times 100$$

式中: V_1 表示新鲜果浆中维生素C的含量, ×10⁻²mg/g; V_2 表示加工产品的维生素C的含量, ×10⁻²mg/g; X_1 表示新鲜果浆的含水率, %; X_2 表示加工后产物的含水率, %。

1.4.4.2 DPPH自由基清除率

精确称取0.5 g果粉(精确至0.001 g),采用30 mL的50%乙醇溶液超声波提取20 min,重复提取两次,于4000 r/min下离心5 min,合并上清液,并定容至100 mL,低温避光待用。分别移取2 mL样品提取液+2 mL、0.2 mmol/L DPPH, 2 mL样品提取液+2 mL无水乙醇,以及2 mL DPPH溶液+2 mL无水乙醇,置

于洁净的编号带塞试管中, 摇匀, 室温下避光显色 30 min 后在波长 517 nm 处分别测定吸光度值 A_i 、 A_j 和 A_o 。计算公式^[12-14]为:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = [A_o - (A_i - A_j)] / A_o \times 100$$

式中: A_i 表示 2 mL DPPH+2 mL 样品提取液的吸光度值; A_j 表示 2 mL 样品提取液+2 mL 无水乙醇的吸光度值; A_o 表示 2 mL DPPH 溶液+2 mL 无水乙醇的吸光度值。

1.4.5 溶解性和微观结构

1.4.5.1 溶解性

果粉溶解性的测定参考陈启聪^[15]。精确称取果粉样品约 1 g (精确至 0.001 g), 置于 150 mL 的小烧杯中, 加入 100 mL 水, 高速磁力搅拌 5 min 混匀, 在 3000 r/min 下离心 5 min, 取上清液于 105 °C 的烘箱中烘干至恒重, 计算上清液中干物质含量所占的比例。

1.4.5.2 微观结构

将西番莲果浆冻干样品进行切分, 截面朝上, 用导电胶固定在样品台上, 采用真空离子喷溅器喷镀 Pt 膜, 置于 S-3400N 扫描电镜下进行观察。

1.5 数据处理

数据统计分析采用 Spass 17.0 和 Origin 8.6 分析软件进行处理。每组数据重复三次, 结果表达式为平均值±标准方差。

2 结果与讨论

2.1 赋形剂对冻干西番莲果粉玻璃化转变温度和吸湿性的影响

玻璃化转变温度 (T_g) 是指非晶态聚合物由玻璃态到橡胶态或橡胶态到玻璃态之间的转变温度^[16], T_g 值的高低直接影响冻干产品的吸湿性^[17]。从图 1 中可见, 与未添加赋形剂的西番莲原果粉的 T_g 值 62.30 °C 相比, 随着麦芽糊精 (MD)、阿拉伯胶 (AG)、乳清分离蛋白 (WPI) 和 大豆分离蛋白 (WPI) 添加量的增加, 果粉的 T_g 值呈上升趋势, 与 T_g 值对应的果粉吸湿性则随着添加量的升高呈降低的趋势。其中, 麦芽糊精、阿拉伯胶和乳清分离蛋白对 T_g 值的影响较显著, 添加量到达 30% 时果粉的 T_g 值分别为 89.87 °C、88.43 °C 和 81.53 °C, 吸湿性与原果粉的 13.93% 相比分别降低至 11.19%、11.67% 和 11.10%。由于 T_g 值的升高可降低果粉的吸湿性^[17], 麦芽糊精^[18]、阿拉伯胶和乳清分离蛋白的添加使得果粉整体的 T_g 值得到了有效的提升, 吸湿性降低显著。但麦芽糊精和阿拉伯胶含有的亲水基团使其果粉的吸湿性相对乳清分离蛋

白高^[19,20]。此外, 大豆分离蛋白对果粉 T_g 值的影响较小, 添加量 30% 的 T_g 值和吸湿性分别为 68.80 °C 和 11.39%。大豆分离蛋白的吸湿性降低作用可能是由于其良好的亲脂亲油和膜成形性质有效地阻隔了空气中的水分与果粉的直接接触^[21]。

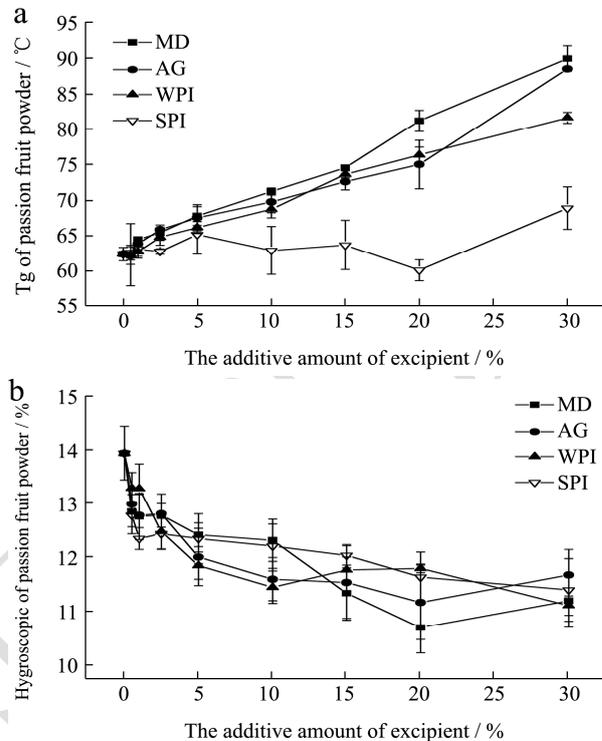


图 1 赋形剂对冻干西番莲果粉 T_g 值 (a) 和吸湿性 (b) 的影响
Fig.1 Influence of excipients on the T_g (a) and hygroscopicity (b) of freeze-dried passion fruit powder

2.2 赋形剂对冻干西番莲果粉水分含量的影响

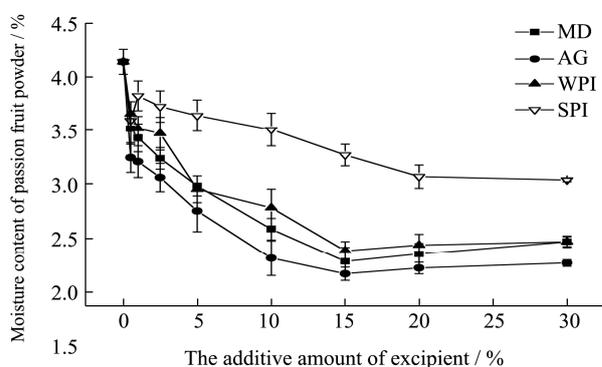


图 2 赋形剂对冻干西番莲果粉水分含量的影响
Fig.2 Influence of excipients on the moisture content of freeze-dried passion fruit powder

水分含量是果蔬干制品品质的一个重要指标, 在冻干果蔬粉中的要求一般为 2%~3%^[22]。如图 2 所示, 与未添加赋形剂西番莲原果粉的水分含量 4.15% 相

比, 随着麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白和大豆分离蛋白四种赋型剂添加量的增加, 果粉终产品的水分含量呈显著降低的趋势。说明四种赋型剂在果粉冻干过程中具有助干效果, 且麦芽糊精、阿拉伯胶和乳清分离蛋白的作用效果类似, 添加量为 0%~15% 时水分含量显著降低, 到达 15% 时果粉接近绝干状态, 含水量分别低至 1.74%、1.59% 和 1.87%, 极大地满足了冻干产品对水分含量的标准要求。而大豆分离蛋白的助干效果相对较慢, 添加量到达 30% 的果粉含水量最低为 2.72%。从图 1a 可知, 赋型剂助干作用的差异与 T_g 值密切相关, T_g 值的升高有助于降低物料的粘度, 减少水分在冻干过程中的阻力, 使得冷冻干燥时间缩短, 产品的干品率得到有效的提高^[23]。

2.3 赋型剂对冻干西番莲果粉维生素 C 和 DPPH 自由基清除率的影响

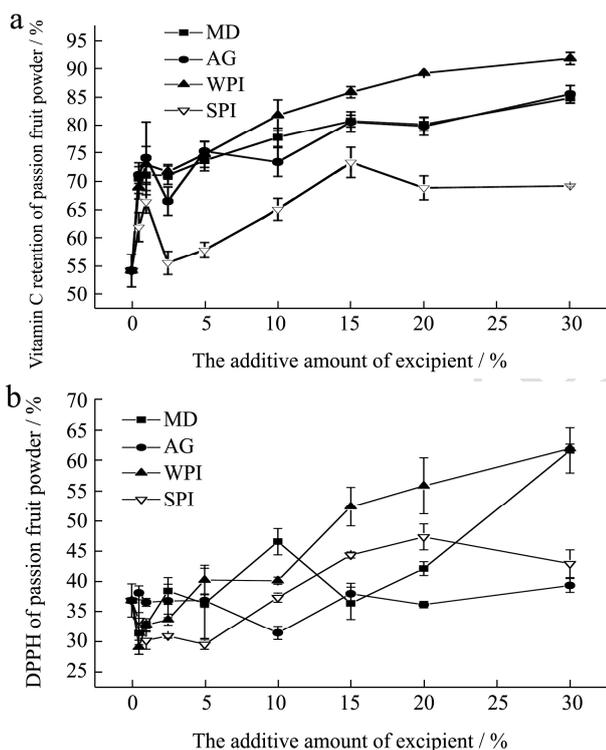


图3 赋型剂对冻干西番莲果粉维生素 C 保留率 (a) 和 DPPH 自由基清除率 (b) 的影响

Fig.3 Influence of excipients on the vitamin C retention rate (a) and DPPH radical scavenging capacity (b) of freeze-dried passion fruit powder

新鲜果蔬中含有大量的维生素、类黄酮、多酚和生物碱等抗氧化活性物质, 但在真空冷冻干燥的升华干燥和解析干燥过程中随着加热板温度的升高, 热敏性的维生素 C 和抗氧化活性物质损失增大。实验结果表明, 未添加赋型剂的西番莲果浆维生素 C 保留率仅

为 54.16%, 对应的 DPPH 自由基清除率为 36.81%。由图 3 可知, 随着赋型剂添加量的升高, 果粉的维生素 C 保留率和 DPPH 自由基清除率均呈上升趋势, 其中, 乳清分离蛋白的作用效果最佳, 当添加量到达 30% 时, 维生素 C 保留率和 DPPH 自由基清除率分别高达 91.85% 和 61.89%。乳清分离蛋白的作用机制主要是由于其提高了果浆的 T_g 值, 物料的粘性降低, 加热板的温度主要用于水分的升华和蒸发, 维生素 C 等热敏性物质的反应降低^[11]。

此外, 当麦芽糊精和阿拉伯胶的添加量到达 30% 时, 果粉维生素 C 保留率分别为 84.84% 和 85.52%, DPPH 自由基清除率相应为 61.60% 和 39.29%。这与麦芽糊精和阿拉伯胶本身的性质有关, 表面含有羟基的阿拉伯胶或麦芽糊精可能与果浆中的供电基团如醛和醇等形成氢键, 使物料和赋型剂更好地结合, 有助于实现更好的包埋^[24]。大豆分离蛋白对维生素 C 保留率和 DPPH 自由基清除率的提高效果较差, 添加量为 15% 时维生素 C 保留率为 73.35%, 添加量到达 20% 时 DPPH 自由基清除率 47.30%。主要的原因在于大豆分离蛋白的 T_g 值对西番莲果粉的影响较小, 且其低溶解性质使之不能完全分散于西番莲果浆中, 在冷冻干燥过程中会受温度和 pH 等环境的影响而无法发挥良好的功能特性。

2.4 赋型剂对冻干西番莲果粉溶解性的影响

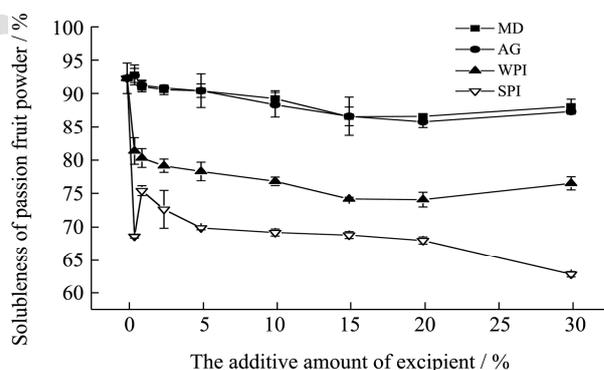


图4 赋型剂对冻干西番莲果粉溶解性的影响

Fig.4 Influence of excipients on the solubility of freeze-dried passion fruit powder

溶解性能的好坏直接影响了固体饮料的冲调和口感, 是评价产品品质高低必不可少的因素之一。由图 4 可知, 西番莲果粉的溶解性随着乳清分离蛋白和大豆分离蛋白添加量的增加呈降低趋势, 而麦芽糊精和阿拉伯胶无显著影响。用相同的方法测定麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白和大豆分离蛋白在水中的溶解性, 结果分别为 92.42%、88.73%、89.19% 和 45.59%。四种赋型剂本身的溶解性能是影响冻干西番莲果粉冲

调性的主要因素,且蛋白质的溶解性易受外界因素(如温度、pH 和离子强度等)的影响, pH 值接近等电点时溶解性最低。因此,为保证冻干西番莲果粉的冲调性和口感,乳清分离蛋白和大豆分离蛋白的添加量应控制在 10%以内。

2.5 赋形剂对西番莲果浆冻干样品微观结构的影响

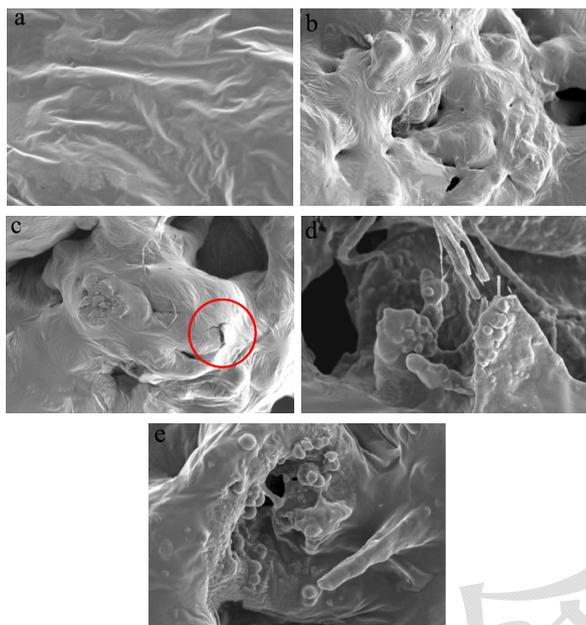


图5 不同西番莲果浆冻干样品的微观结构

Fig.5 Microstructures of different freeze-dried passion fruit pulp samples

注: a 为西番莲果浆冻干样品; b 为麦芽糊精西番莲果浆冻干样品; c 为阿拉伯胶西番莲果浆冻干样品; d 为乳清分离蛋白西番莲果浆冻干样品; e 为大豆分离蛋白西番莲果浆冻干样品。

如图 5a 所示,冻干西番莲原果浆样品的表面形态特征与赵凤敏等^[11]对葡萄果浆的冻干样品微观结构图相似。说明在干燥过程中大量的可溶性糖(如葡萄糖、果糖和蔗糖等)随着温度的升高变成熔融的橡胶态,物料崩塌,冰晶因内部的空隙被堵塞而无法升华,解析干燥期间所提供的热量主要用于水分的蒸发^[11],物料的营养物质、抗氧化活性成分和风味物质损失,色泽变化。

麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白和大豆分离蛋白的添加在冻干过程中有助于保持果浆物料的疏松多孔结构,水分蒸发的阻力减小,干燥效率升高,营养和风味物质的损失降低。其中,阿拉伯胶在物料的表面形成了类似包覆层的保护膜,乳清分离蛋白和大豆分离蛋白呈现出球状的类似微胶囊的包埋结构。这

一现象与不同赋形剂的 T_g 值和成膜性相关。乳清分离蛋白良好的表面活性性质使其可以优先迁移到空气-水界面,在干燥过程中与成膜属性相结合,在物料的表面形成包覆层^[4];而大豆分离蛋白良好的乳化性和成膜性既能降低水和油的界面张力,又能降低水和空气的界面张力,形成致密的微胶囊结构^[21]。

3 结论

随着赋形剂麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白和大豆分离蛋白添加量的增加,冻干西番莲果粉的吸湿性和溶解性均呈下降趋势;而玻璃化转变温度、维生素 C 保留率和 DPPH 自由基清除率均呈上升趋势。其中,添加大豆分离蛋白制备的果粉玻璃化转变温度较低、吸湿性高、溶解性能差;麦芽糊精使得果粉的玻璃化转变温度从 62.30 °C 增加到 89.87 °C,并有效降低其吸湿性至 10.69%;阿拉伯胶使得果粉的水分含量从 4.15%降低至 1.56%;而乳清分离蛋白使得果粉的维生素 C 保留率由 54.16%提高至 91.85%,DPPH 自由基清除率由 36.81%提高至 61.89%。一方面赋形剂可以作为稀释剂,有助于西番莲果浆在冻干过程中保持疏松多孔结构,防止果粉中的糖类结块粘连,增加干燥效率;另一方面,也可能在果粉的表面形成类似包覆层的保护膜或类似微胶囊的包埋结构,保护产品的品质。

参考文献

- [1] Dos Santos P A, Caliar M, Soares M S, et al. Whey powder, broken rice grains and passion fruit peel flour in extruded breakfast cereals: physical, chemical and functional characteristics [J]. Food Science and Technology Research, 2015, 21(3): 317-325
- [2] 周龙飞.西番莲喷雾粉加工过程的褐变原因解析[D].南宁:广西大学,2014
ZHOU Long-fei. Cause analysis of browning in process of passion fruit spray powder [D]. Nanning: Guangxi University, 2014
- [3] 张爱玉.西番莲果汁加工及其原汁含量检测方法的研究[D].长沙:湖南农业大学,2005
ZHANG Ai-yu. Passion fruit juice processing and research on juice content examination method [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005
- [4] 蒂莫西·兰格力士,王硕思.蔬菜与果汁粉-蛋白质赋形剂的应用:中国,CN103108558A[P] 2013-11-17
TIMOTHY L, WANG Shuo-si. Vegetable and fruit juice powder-application of protein excipient: China,

- CN103108558A [P] 2013-11-17
- [5] Adhikari B, Howes T, Bhandari B R, et al. Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modeling [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(1): 53-68
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Lago C C, Bernstein A, Brandelli A, et al. Characterization of powdered yacon (*Smallanthus sonchifolius*) juice and pulp [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(6): 2183-2191
- [9] GB 50093-2010, 食品安全国家标准食品中水分的测定[S]
GB 50093-2010, National food safety standard- determination of moisture in foods [S]
- [10] GB/T 6195-1986, 水果、蔬菜维生素 C 含量测定法(2,6-二氯靛酚滴定法)[S]
GB/T 6195-1986, Determination method of Vitamin C Content of fruits, vegetables (2,6-dichloro indophenol titration method) [S]
- [11] 赵凤敏,李树君,张小燕,等.常见浆果的真空冷冻干燥特性研究[J].*现代食品科技*,2014,30(4):220-225
ZHAO Feng-min, LI Shu-jun, ZHANG Xiao-yan, et al. Vacuum freeze-drying characteristics of common berries [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(4): 220-225
- [12] 鲁小利,海铮,王俊.可乐饮料的电子鼻检测研究[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2006,32(6):677-682
LU Xiao-li, HAI Zheng, WANG Jun. Detection of cola beverage by electronic nose [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2006, 32(6): 677-682
- [13] 朱利娜,强伟,史俊友,等.唐古特白刺果粉的抗氧化作用研究[J].*中国野生植物资源*,2010,29(2):41-43,47
ZHU Li-na, QIANG Wei, SHI Jun-you, et al. Study on antioxidant activity of juice powder from *nitraria tangutorum* powder [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2010, 29(2): 41-43, 47
- [14] 马宁安,何茂军,鲁平原,等.沙棘果粉体外抗氧化活性的研究[J].*国际沙棘研究与开发*,2014,2:25-28
MA Ning-an, HE Mao-jun, LU Ping-yuan, et al. Study on antioxidant activity *in vitro* of seabuckthorn fruit powder [J]. *International Seabuckthorn Research and Development*, 2014, 2: 25-28
- [15] 陈启聪.微胶囊速溶香蕉粉的制备及其相关技术的研究[D].广州:华南理工大学,2010
CHEN Qi-cong. A study on preparation of microcapsulated banana powder via spray drying [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010
- [16] Dromen D M. Characterization of volatile loss from dry food polymer materials [D]. The University of Minnesota, 2004
- [17] H S Phanindrakumar, K Radhakrishna, S Mahesh, et al. Effect of pretreatments and additives on the thermal behavior and hygroscopicity of freeze-dried pineapple juice powder [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2005, 29: 307-318
- [18] Isis Celena Amaral, Mirella Tamiê Sarquis Silva, Daniele Fernanda Pereira, et al. Effect of carrier agents on the physical and thermal stability of freeze-dried passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) pulp [J]. *Drying Technology*, 2016, 34(6): 713-722
- [19] Canuto H M P, Afonso M R A, Costa J M C D. Hygroscopic behavior of freeze-dried papaya pulp powder with maltodextrin [J]. *Acta Scientiarum. Technology*, 2013, 36(1): 137-141
- [20] Haque M K, Roos Y H. Differences in the physical state and thermal behavior of spray-dried and freeze-dried lactose and lactose/protein mixtures [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2006, 7(1-2): 62-73
- [21] 李欣荣.大豆分离蛋白的微胶囊包埋性质研究[D].广州:华南理工大学,2012
LI Xin-rong. Microcapsulation properties of soy protein isolate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [22] Mosquera L H, Moraga G, Martínez-Navarrete N. Critical water activity and critical water content of freeze-dried strawberry powder as affected by maltodextrin and arabic gum [J]. *Food Research International*, 2012, 47(2): 201-206
- [23] 梁杰.冻干草莓粉固体饮料速溶性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012
LIANG Jie. The study on the solubility of the instant solid beverage with strawberry powder in vacuum freeze drying [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2012
- [24] Charikleia C C T. Arabic gum mixtures as encapsulating agents of freeze-dried fennel oleoresin products [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(4): 1057-1065