

冷冻贮藏对喷雾干燥羊乳粉品质特性的影响

鱼喆喆, 付尚辰, 朱丽, 刘永峰*

(陕西师范大学 食品工程与营养科学学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 对新鲜羊乳、低温冷冻(-16~-18 ℃)和超低温冷冻(-76~-80 ℃)贮藏3个月的常温解冻(20~25 ℃)羊乳进行喷雾干燥,制备了鲜羊乳粉、低温冷冻常温解冻(CFHT)羊乳粉和超低温冷冻常温解冻(UFHT)羊乳粉,对其品质进行比较分析。结果表明:喷雾干燥羊乳粉的水分质量分数符合国家标准,水分活度均小于0.2,总色差(ΔE)均小于0.3,具有良好的贮藏特性;3组羊乳粉复水后多分散性指数(PDI)均小于0.3;激光共聚焦显微镜图像显示3组羊乳粉复水后组间脂肪球与蛋白质颗粒无明显差异。相比于鲜羊乳粉,CFHT和UFHT羊乳粉的脂肪损失较严重($P < 0.05$),蛋白质和乳糖质量分数损失10%~19%($P < 0.05$);而UFHT羊乳粉的蛋白质和乳糖高于CFHT羊乳粉,水分质量分数和水分活度低于CFHT羊乳粉。因此,冷冻贮藏可用于喷雾干燥羊乳粉的制备,且UFHT羊乳粉的品质优于CFHT羊乳粉。

关键词: 冷冻贮藏;羊乳粉;喷雾干燥;品质

中图分类号:TS 252.51 文章编号:1673-1689(2023)09-0066-08 DOI:10.12441/spyswjs.20221123003

Effect of Frozen Storage on Spray-Dried Goat Milk Powder Quality Characteristics

YU Zhezhe, FU Shangchen, ZHU Li, LIU Yongfeng*

(College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: In this research, fresh goat milk was frozen at cryogenic temperature (-16~-18 ℃) and ultra-cryogenic temperature(-76~-80 ℃) for 3 months, and thawed at room temperature(20~25 ℃). Then, the stored samples were subjected to spray drying to prepare fresh goat milk powder, goat milk powder that was cold-frozen and thawed at room temperature(CFHT), and goat milk powder that was ultra-low-temperature frozen and thawed at room temperature (UFHT). And the quality of resulting powders was compared and analyzed. The results showed that the moisture content of spray-dried goat milk powder met the national standard, with water activity below 0.2 and total color difference (ΔE) below 0.3, indicating good storage characteristics. In addition, PDI values of all goat milk powders after rehydration were all below 0.3. Confocal laser scanning microscopy images revealed no significant differences in both fat globules and protein particles among the three groups of rehydrated goat milk powders. Compared with the fresh goat milk powder, CFHT and UFHT goat

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-04-06

项目基金: 陕西省重点研发计划项目(2022ZDLNY04-09);陕西省林业科技创新计划项目(SXLK2021-0221);陕西省咸阳市科技计划项目(2021ZDZX-NY-0014)。

* 通信作者: 刘永峰(1981—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事畜产品科学与营养研究。E-mail: yongfeng200@126.com

milk powders exhibited more severe fat loss ($P<0.05$), as well as protein and lactose losses of 10%~19% ($P<0.05$). Furthermore, UFHT goat milk powder had higher protein and lactose content than CFHT goat milk powder, while its moisture content and water activity were lower than those of CFHT goat milk powder. Therefore, frozen storage can be used in the preparation of spray-dried goat milk powder, and the quality of UFHT goat milk powder is better than CFHT goat milk powder.

Keywords: frozen storage, goat milk powder, spray drying, quality

羊乳是陕西特色优势资源,含有丰富的生物活性物质、必需脂肪酸、维生素和矿物质等营养和生物活性物质^[1-2]。而羊乳粉是乳品市场上最常见的羊乳制品^[3],具有保质期长,易于包装、贮存和运输,水分质量分数低,不需要冷藏条件等优点,同时可以保留原料乳中的大部分营养成分。目前,喷雾干燥是乳粉生产中应用最广泛的技术,主要包括浓缩、雾化、雾滴与空气接触、雾滴干燥和分离 5 个步骤^[4]。据统计,全球 95% 以上的乳粉是由喷雾干燥的方式生产的。喷雾干燥技术经过 100 多年的发展已经相对成熟,得到的产品品质稳定、粒度小而均匀、流动性和速溶性好^[5]。

虽然在过去的 50 年里,全世界的羊乳产量增加了一倍多^[6],但奶山羊作为小型反刍动物,分布相对分散,且以农户散养、中小型牧场饲养为主^[7],不利于山羊乳的大规模工业化生产^[8]。此外,由于羊乳生产的季节性强、产量低、奶山羊哺乳期短等原因,原料乳通常会被冷冻在农场,直至积累到足够的量供进一步的乳制品加工^[9-10]。相关研究中针对不同温度下冷冻贮藏不同时间羊乳的品质变化进行了分析^[7,9,11-13]。此外,Katsiari 等发现用冷冻绵羊乳制作的酸奶,具有与鲜乳制作的酸奶相似的理化性质、感官特性和稳定性^[10]。Zhang 等发现冷冻对绵羊乳及其奶酪的脂肪酸浓度没有影响,且在不影响奶酪产量的情况下,可以使用-15℃或-25℃冷冻 6 个月的绵羊乳生产出优质奶酪^[12]。但根据查阅文献所知,目前鲜有关于以冷冻乳为原料制作乳粉的相关研究。

Yu 等研究了冷冻贮藏 3 个月山羊乳解冻后的营养与理化品质的变化,发现超低温冷冻常温解冻(UFHT)是保持羊乳天然品质的最佳方法,考虑成本也可以选择低温冷冻常温解冻(CFHT)的方法贮藏羊乳^[14]。在此基础上,将低温冷冻和超低温冷冻贮藏 3 个月后常温解冻的羊乳作为原料,制备喷雾干燥羊乳粉,研究冷冻贮藏对喷雾干燥羊乳粉品质特

性的影响,为冷冻羊乳的后续应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验原料

新鲜羊乳样品采集于西安市郊区奶山羊养殖户所饲养的奶山羊,5 只健康奶山羊的羊乳等量混合后,放入冰袋中运送到实验室。

1.1.2 实验试剂

尼罗红:阿拉丁试剂(上海)有限公司产品;异硫氰酸荧光素(FITC):Sigma 试剂公司产品;无水乙醇(分析纯):天津市天力化学试剂有限公司产品。

1.1.3 实验仪器

BI-90Plus 激光粒度仪:美国 Brookhaven 公司产品;HD-5 型智能水分活度测量仪:无锡华科仪器仪表有限公司产品;FV1200 激光共聚焦显微镜:日本 Olympus 公司产品;BCD-578WPU9CX 家用冰箱:合肥美菱股份有限公司产品;DW-HL388 超低温冷冻储存箱:中科美菱低温科技有限责任公司产品;LactoStar 乳成分分析仪:德国 Funke Gerber 公司产品;NS800 手持色差仪:深圳市三恩驰科技有限公司产品;JA2003N 电子天平:上海精密仪器有限公司产品;YC-015 喷雾干燥机:上海雅程仪器设备有限公司产品。

1.2 实验方法

新鲜羊乳样品采回后立即进行喷雾干燥制成鲜羊乳粉。其余样品分别在低温冰箱(-16~-18℃)和超低温冰箱(-76~-80℃)中冷冻贮藏 3 个月,然后在 20~25℃的常温条件下解冻后进行喷雾干燥,分别制成 CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉。并与鲜羊乳粉在营养成分、水分质量分数、水分活度、色泽、粒径分布、Zeta 电位、微观结构等方面进行比较分析。喷雾干燥机设定参数:进风温度 140℃,出风温度约 90℃,蠕动泵转速 15 r/min。

1.3 指标测定

1.3.1 营养成分的测定 将羊乳粉用蒸馏水按 1 g:10 mL 的比例复水后,使用乳成分分析仪测定复水乳样品中的脂肪、蛋白质和乳糖。

1.3.2 水分质量分数的测定 按照 GB 5009.3—2016 直接干燥法测定羊乳粉样品的水分质量分数。

1.3.3 水分活度的测定 使用水分活度测量仪对羊乳粉样品的水分活度进行测定。

1.3.4 色泽的测定 采用手持色差仪^[15]测定羊乳粉样品的亮度、红绿度和黄蓝度,并按照以下公式计算样品的总色差:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

式中: ΔE 为羊乳粉样品的总色差; L^* 为羊乳粉样品的亮度; a^* 为羊乳粉样品的红绿度; b^* 为羊乳粉样品的黄蓝度; L_0 为鲜羊乳粉的亮度; a_0 为鲜羊乳粉的红绿度; b_0 为鲜羊乳粉的黄蓝度。

1.3.5 粒径分析 羊乳粉用蒸馏水按 1 g:10 mL 的比例复水后,用超纯水稀释 200 倍,使用激光粒度仪测定粒径。粒径分布分析基于以下条件:实际折射率为 1.59,流体(水)折射率为 1.33。

1.3.6 Zeta 电位的测定 羊乳粉用蒸馏水按 1 g:10 mL 的比例复水后,用超纯水稀释 200 倍,使用激光粒度仪测定 Zeta 电位。

1.3.7 激光共聚焦显微镜图像 羊乳粉用蒸馏水按 1 g:10 mL 的比例复水后,用 10 μ L 尼罗红 (1 mg/mL 乙醇溶液) 和 10 μ L 异硫氰酸荧光素 (FITC, 1 mg/mL 乙醇溶液) 对 1 mL 复水羊乳样品染色 30 min。吸取 20 μ L 的染色样品滴至载玻片,用盖玻片密封,并立即在暗室中用激光共聚焦显微镜观测^[16]。激光共聚焦显微镜配备倒置显微镜和硅油物镜(放大倍数为 150 倍);尼罗红和 FITC 的激发波长分别为 534、488 nm,发射波长分别为 500~600 nm 和 495~559 nm。

1.3.8 数据处理方法

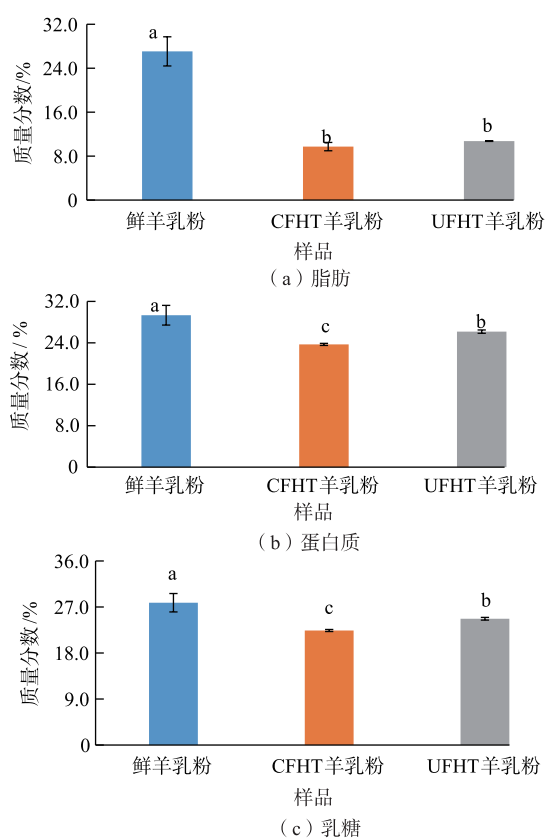
结果表示为“平均值 $\pm$ 标准差”。实验数据采用 SPSS 24.0 进行单因素方差分析和显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异性显著(Duncan)。采用 Excel 2013 进行数据整理和图片绘制。

2 结果与分析

2.1 喷雾干燥羊乳粉的营养成分分析

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的脂

肪、蛋白质和乳糖质量分数如图 1 所示。鲜羊乳粉的脂肪质量分数为(27.1 $\pm$ 2.7)%、蛋白质质量分数为(29.3 $\pm$ 1.9)%、乳糖质量分数为(27.8 $\pm$ 1.8)%。与鲜羊乳粉相比,CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的脂肪质量分数分别降低了 64%和 60%($P < 0.05$);蛋白质质量分数分别降低了 19%和 10%($P < 0.05$);乳糖质量分数分别降低了 19%和 11%($P < 0.05$)。总的来说,脂肪损失较严重,蛋白质和乳糖损失较少;而 UFHT 羊乳粉的脂肪、蛋白质和乳糖质量分数均高于 CFHT 羊乳粉。



不同小写字母表示处理组间差异显著($P < 0.05$)。

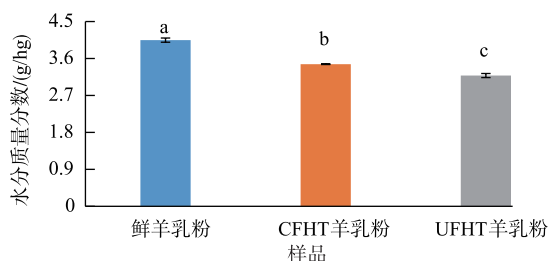
图 1 喷雾干燥羊乳粉的营养成分

Fig. 1 Nutritional composition of spray-dried goat milk powder

2.2 喷雾干燥羊乳粉的水分质量分数分析

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的水分质量分数如图 2 所示。鲜羊乳粉的水分质量分数为(4.047 $\pm$ 0.051) g/hg,CFHT 羊乳粉的水分质量分数为(3.461 $\pm$ 0.008) g/hg,UFHT 羊乳粉的水分质量分数为(3.185 $\pm$ 0.050) g/hg,均符合国家标准(GB

19644—2010)对乳粉的要求(水分质量分数 ≤ 5.0 g/hg)。且 CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的水分质量分数显著低于鲜羊乳粉($P<0.05$)。



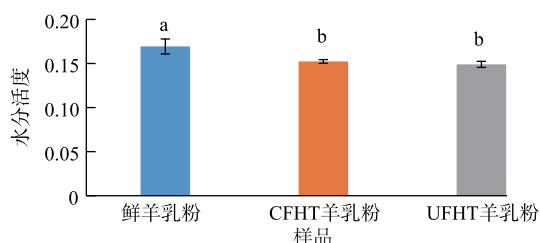
不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图 2 喷雾干燥羊乳粉水分质量分数

Fig. 2 Mass fraction of moisture in spray-dried goat milk powder

2.3 喷雾干燥羊乳粉的水分活度分析

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的水分活度如图 3 所示,分别为 0.169 ± 0.009 、 0.152 ± 0.002 和 0.149 ± 0.003 。CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的水分活度显著小于鲜羊乳粉($P<0.05$),且均小于 0.2,这与乳中水分质量分数(见图 2)结果一致。



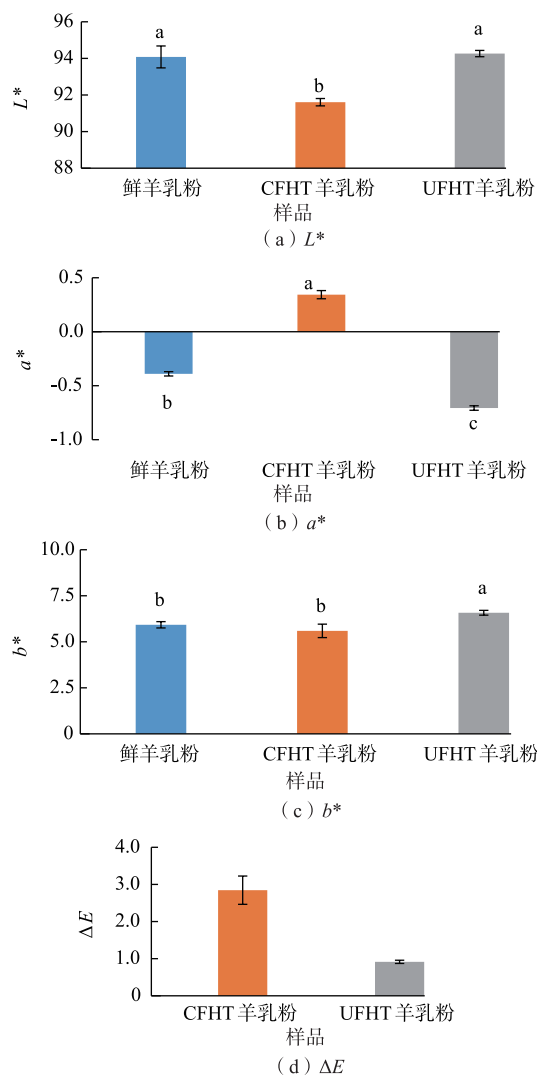
不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图 3 喷雾干燥羊乳粉的水分活度

Fig. 3 Water activity of spray-dried goat milk powder

2.4 喷雾干燥羊乳粉的色泽变化

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的色泽如图 4 所示。CFHT 羊乳粉的 L^* 值显著低于 UFHT 羊乳粉和鲜羊乳粉($P<0.05$),说明 CFHT 羊乳粉的亮度较低。对于 a^* 值,只有 CFHT 羊乳粉的 a^* 值大于 0,UFHT 羊乳粉 a^* 值显著低于鲜羊乳粉($P<0.05$),说明 CFHT 羊乳粉的色泽偏红,其余偏绿。对于 b^* 值,UFHT 羊乳粉的 b^* 值显著高于鲜羊乳粉和 CFHT 羊乳粉($P<0.05$),说明 UFHT 羊乳粉偏黄。以鲜羊乳粉为基础,CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的 ΔE 值分别为 2.84 ± 0.36 和 0.91 ± 0.26 ,CFHT 羊乳粉的色差较大。



不同小写字母表示处理组间差异显著($P<0.05$)。

图 4 喷雾干燥羊乳粉的色泽

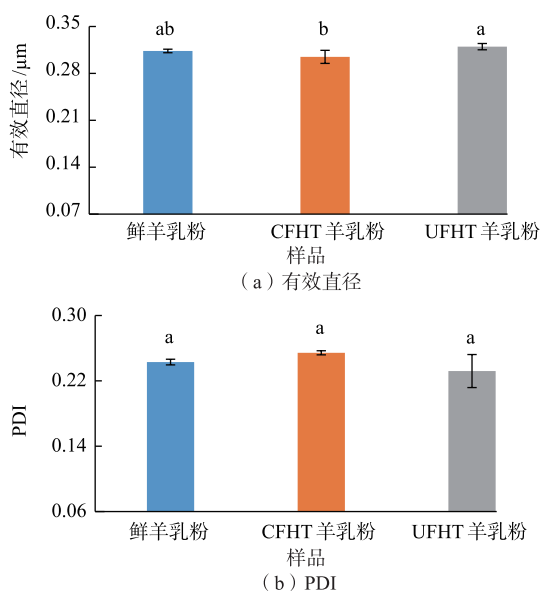
Fig. 4 Colour of spray-dried goat milk powder

2.5 喷雾干燥羊乳粉的粒径变化

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉颗粒的有效直径与多分散性指数(PDI)如图 5 所示。相比于鲜羊乳粉,CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉颗粒的有效直径没有显著变化($P>0.05$),但 CFHT 羊乳粉的有效直径显著低于 UFHT 羊乳粉($P<0.05$)。3 组羊乳粉 PDI 均小于 0.3,且 CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的 PDI 与鲜羊乳粉相比无显著差异($P>0.05$),说明羊乳粉复水后其粒径分布范围较窄,体系较稳定。

2.6 喷雾干燥羊乳粉的 Zeta 电位分析

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的 Zeta 电位如图 6 所示。3 组羊乳粉的 Zeta 电位都呈

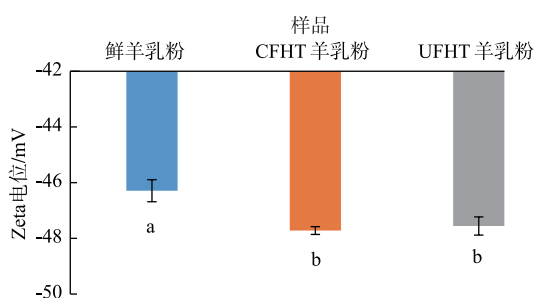


不同小写字母表示处理组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 喷雾干燥羊乳粉的粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of spray-dried goat milk powder

负值 ($-46.29 \sim -47.72$ mV), 绝对值大于 46.00, 稳定性良好。CFHT 羊乳粉、UFHT 羊乳粉的 Zeta 电位绝对值显著大于鲜羊乳粉 ($P < 0.05$), 但两者之间无显著差异 ($P > 0.05$)。



不同小写字母表示处理组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 喷雾干燥羊乳粉的 Zeta 电位

Fig. 6 Zeta potential of spray-dried goat milk powder

2.7 喷雾干燥羊乳粉外观及微观结构分析

鲜羊乳粉、CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的外观及微观结构如图 7 所示。从外观图中可观察到 3 组喷雾干燥羊乳粉色泽、组织状态等相近。尼罗红和 FITC 将脂肪球和蛋白质分别染为红色和绿色, 在激光共聚焦显微镜下更易观察, 如图 7 所示, 脂肪球和蛋白质清晰可见, 蛋白质颗粒结构稳定, 但 3 组喷雾干燥羊乳粉中的脂肪球颗粒均大小不一, 分布不一致。

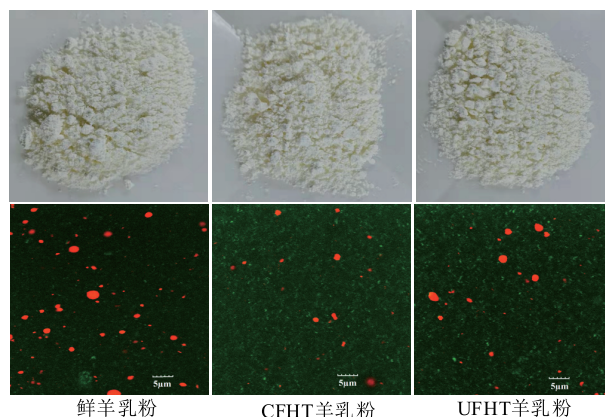


图 7 喷雾干燥羊乳粉的外观及微观结构

Fig. 7 Appearance and microscopic structures of spray-dried goat milk powder

2.8 讨论

冷冻贮藏可有效延长羊乳的保质期, 通过前期研究, 发现超低温冷冻 80 d 常温解冻羊乳的营养成分和理化特性更接近于新鲜羊乳, 羊乳品质良好, 可用于后续的乳制品生产加工^[14]。而脱水干燥也是保存乳的一种重要方法, 可以在不改变羊乳营养和感官属性的情况下延长羊乳的保质期^[17]。这使得乳制品企业可以全年向消费者提供乳制品, 并可将市场扩展到更偏远的地区, 且运输更容易, 成本更低。羊乳粉也是我国羊乳市场的主要消费种类, 而乳粉生产中最常用的方式是喷雾干燥。

本研究中将低温冷冻和超低温冷冻贮藏 3 个月的羊乳喷雾干燥制成 CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉, 与鲜羊乳粉进行比较分析。喷雾干燥羊乳粉保留了原料乳中的大部分营养成分, 与前期对冷冻贮藏羊乳的研究一致^[14], 羊乳粉中变化最明显的营养成分也是脂肪, CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的脂肪质量分数比鲜羊乳粉分别降低了 64%、60%, 这个结果表明冷冻贮藏羊乳或许可以用于后续脱脂乳粉的生产。脂肪质量分数的下降可能是由于甘油三酯 (TAG) 分解为了游离脂肪酸、二甘油酯和单甘油酯^[18]。Pons 等研究了在 -20 °C 条件下贮藏的母乳, 发现其 TAG 含量下降, 而游离脂肪酸和 1,2-二甘油酯含量增加^[19]。此外, 冷冻过程中形成的冰晶也会破坏脂肪球结构从而引起脂肪含量下降。与鲜羊乳粉相比, CFHT 羊乳粉和 UFHT 羊乳粉的蛋白质质量分数的下降, 一方面可能是因为冻融过程中蛋白质酶进一步水解蛋白质形成了肽段或游离氨基酸^[20];

另一方面可能是杀菌、浓缩、喷雾干燥等热处理过程引起了蛋白质结构变化,造成质量分数下降^[21]。乳糖质量分数的下降可能是因为乳中嗜冷微生物在冷冻贮藏过程中利用乳糖进行了生物代谢^[22-23]。与冷冻贮藏羊乳研究一致的是,UFHT羊乳粉的营养成分保留优于CFHT羊乳粉。

乳粉可以长期保存的一个重要原因是脱除液态乳中大部分水分后,乳粉的水分活度降低,大部分微生物生长活动被抑制,酶活力和生化反应的发生受到限制^[24]。本研究中,3组羊乳粉的水分质量分数均小于5.0 g/hg,水分活度均小于0.2,其中,CFHT羊乳粉和UFHT羊乳粉的水分质量分数与水分活度均低于鲜羊乳粉,可能是因为冷冻解冻过程中温度变化造成气压差,出现了冰结晶的升华现象,从而使解冻后液态乳中的水分质量分数低于新鲜羊乳,但还需后续的进一步实验分析。目前人们普遍认为,当水分活度小于0.7时,可有效抑制食品中细菌、霉菌及酵母菌的生长;当水分活度小于0.5时,可以抑制几乎所有微生物的生长繁殖^[25]。因此,CFHT羊乳粉和UFHT羊乳粉的初始水分质量分数与水分活度都利于保藏,当后续贮藏条件合适时,超低温冷冻和低温冷冻贮藏羊乳制成的羊乳粉可以长期保藏。

羊乳粉的色泽参数直接反映其感官品质,影响消费者对羊乳粉产品的可接受度。只有当 ΔE 值大于2时,才可以肉眼观察到颜色的差异^[11]。本研究中,UFHT羊乳粉的 ΔE 值为 0.91 ± 0.26 ,而CFHT羊乳粉的 ΔE 值为 2.84 ± 0.36 。但前期研究发现,羊乳冷冻贮藏80 d引起的颜色差异可以忽略不计^[14],CFHT羊乳粉色泽的变化可能是热处理过程中乳内部的羰基化合物与氨基化合物发生的美拉德反应产生了类黑素,从而影响最终产品颜色^[26-27]。也有研究显示,脱脂乳粉呈黄白色,而高蛋白质粉呈灰白

色^[28],乳粉中不同含量的营养物质可能也引起其色泽差异。

乳中颗粒的大小与稳定性高度相关,颗粒越小越有利于乳的稳定^[29-30]。Miao等研究了不同处理方式对驴乳的影响,发现当温度高于85℃时,可以检测到驴乳颗粒尺寸的增加^[31]。此外,Kaskous发现喷雾干燥骆驼乳粉的理化性质(水分活度、粉末颜色、溶解度、流动性、产率等)在很大程度上受饲料的影响^[32]。虽然激光共聚焦显微镜图像显示脂肪球分布较不一致,但从颗粒有效直径来看,本研究制备的喷雾干燥羊乳粉稳定性良好,这可能与羊乳粉的加工方式、生鲜羊乳原料等相关。Zeta电位也是衡量系统稳定性的重要指标,已被用作脂肪球和酪蛋白胶束的电荷指标。一般来说,Zeta电位绝对值越高,系统越稳定^[31]。喷雾干燥羊乳粉的Zeta电位绝对值都大于46.00 mV,也表明羊乳粉具有良好的稳定性。总的来说,本研究中以冷冻贮藏羊乳为原料制备的喷雾干燥羊乳粉贮藏特性与稳定性良好,且UFHT羊乳粉的品质优于CFHT羊乳粉。

3 结 语

以冷冻贮藏3个月的羊乳为原料制备喷雾干燥羊乳粉,通过对其营养与理化品质的研究发现,CFHT羊乳粉和UFHT羊乳粉的脂肪较新鲜羊乳粉损失较严重,乳糖和蛋白质损失较少,而UFHT羊乳粉的脂肪、蛋白质和乳糖质量分数均高于CFHT羊乳粉。此外,喷雾干燥羊乳粉的水分质量分数符合国家标准,水分活度均小于0.2,易于长期保藏;粒径、Zeta电位结果与激光共聚焦显微镜图像显示喷雾干燥羊乳粉复水后稳定性较好。总的来说,以冷冻贮藏羊乳为原料制备的喷雾干燥羊乳粉品质良好,且UFHT羊乳粉的品质优于CFHT羊乳粉。

参考文献:

- [1] 艾对,张富新,于玲玲,等.羊奶中挥发性成分顶空固相微萃取条件的优化[J].食品与生物技术学报,2015,34(1):40-46.
AI D,ZHANG F X,YU L L,et al. Optimization of head space solid phase micro-extraction conditions for volatile components in goat milk[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*,2015,34(1):40-46. (in Chinese)
- [2] 邵言蹊,刘大松,徐姝,等.低温诱导羊乳中 β -酪蛋白从胶束中解离的研究[J].食品与生物技术学报,2021,40(8):27-36.
SHAO Y X,LIU D S,XU S,et al. Dissociation of β -casein from casein micelles in skimmed goat milk at low temperature[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*,2021,40(8):27-36. (in Chinese)

- [3] 乔春艳. 多重检测技术对市售羊奶粉品质结果的差异性分析研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2021.
- [4] PATEL R P. Spray drying technology; an overview[J]. **Indian Journal of Science and Technology**, 2009, 2(10): 44-47.
- [5] O'SULLIVAN J J, NORWOOD E A, O'MAHONY J A, et al. Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: a review[J]. **Journal of Food Engineering**, 2019, 243: 57-69.
- [6] PULINA G, MILÁN M J, LAVÍN M P, et al. Invited review: current production trends, farm structures, and economics of the dairy sheep and goat sectors[J]. **Journal of Dairy Science**, 2018, 101(8): 6715-6729.
- [7] TRIBST A A L, FALCADE L T P, RIBEIRO L R, et al. Impact of extended refrigerated storage and freezing/thawing storage combination on physicochemical and microstructural characteristics of raw whole and skimmed sheep milk[J]. **International Dairy Journal**, 2019, 94: 29-37.
- [8] TRIBST A A L, RIBEIRO L R, DE CASTRO L B R, et al. Fermentation profile and characteristics of yoghurt manufactured from frozen sheep milk[J]. **International Dairy Journal**, 2018, 78: 36-45.
- [9] WENDORFF W L. Freezing qualities of raw ovine milk for further processing[J]. **Journal of Dairy Science**, 2001, 84: 74-78.
- [10] KATSIARI M C, VOUTSINAS L P, KONDYLI E. Manufacture of yoghurt from stored frozen sheep's milk[J]. **Food Chemistry**, 2002, 77(4): 413-420.
- [11] TRIBST A A L, FALCADE L T P, DE OLIVEIRA M M. Strategies for raw sheep milk storage in smallholdings: effect of freezing or long-term refrigerated storage on microbial growth[J]. **Journal of Dairy Science**, 2019, 102(6): 4960-4971.
- [12] ZHANG R H, MUSTAFA A F, NG-KWAI-HANG K F, et al. Effects of freezing on composition and fatty acid profiles of sheep milk and cheese[J]. **Small Ruminant Research**, 2006, 64(3): 203-210.
- [13] KLJAJEVIC N V, JOVANOVIĆ S T, MILORADOVIĆ Z N, et al. Influence of the frozen storage period on the coagulation properties of caprine milk[J]. **International Dairy Journal**, 2016, 58: 36-38.
- [14] YU Z Z, QIAO C Y, ZHANG X R, et al. Screening of frozen-thawed conditions for keeping nutritive compositions and physicochemical characteristics of goat milk[J]. **Journal of Dairy Science**, 2021, 104(4): 4108-4118.
- [15] 刘永峰, 鱼喆喆, 申倩, 等. 冻融对牛奶酸度、色泽与营养成分的变化研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 51-59.
- LIU Y F, YU Z Z, SHEN Q, et al. The changes of acidity, color and nutritional composition in frozen-thawed raw milk[J]. **Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)**, 2021, 49(3): 51-59. (in Chinese)
- [16] LI S Q, SHAH N P. Effects of *Pleurotus eryngii* polysaccharides on bacterial growth, texture properties, proteolytic capacity, and angiotensin-I-converting enzyme-inhibitory activities of fermented milk[J]. **Journal of Dairy Science**, 2015, 98(5): 2949-2961.
- [17] SILANIKOVE N, LEITNER G, MERIN U, et al. Recent advances in exploiting goat's milk: quality, safety and production aspects[J]. **Small Ruminant Research**, 2010, 89(2/3): 110-124.
- [18] GARCÍA-LARA N R, ESCUDER-VIECO D, GARCÍA-ALGAR O, et al. Effect of freezing time on macronutrients and energy content of breastmilk[J]. **Breastfeeding Medicine**, 2012, 7(4): 295-301.
- [19] PONS S M, BARGALLÓ A, SABATER M. Evaluation by high-performance liquid chromatography of the hydrolysis of human milk triacylglycerides during storage at low temperatures[J]. **Journal of Chromatography A**, 1998, 823(1/2): 467-474.
- [20] KHALDI N, VIJAYAKUMAR V, DALLAS D C, et al. Predicting the important enzymes in human breast milk digestion[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2014, 62(29): 7225-7232.
- [21] 薛海燕, 李晶莹, 赵娴慧, 等. 基于蛋白质结构及相互作用的羊乳热凝聚物形成分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 175-181.
- XUE H Y, LI J Y, ZHAO X H, et al. Analysis of thermal aggregation in goat milk based on protein structure and interaction[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2023, 49(3): 175-181. (in Chinese)
- [22] GIRIBALDI M, ORTOFFI M F, GIUFFRIDA M G, et al. Effect of prolonged refrigeration on the protein and microbial profile of

- human milk[J]. **International Dairy Journal**, 2013, 31(2): 121-126.
- [23] GKMEN B G, ZCAN O, TASLAK H, et al. Effect of freezing time on tissue factor activity and macronutrients of human milk[J]. **Protein Journal**, 2020, 39(5): 591-597.
- [24] PAL M, ALEMU J, MULU S, et al. Microbial and hygienic aspects of dry milk powder[J]. **Beverage & Food World**, 2016, 43(7): 28-31.
- [25] 夏晓霞, 薛艾莲, 寇福兵, 等. 冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析[J]. **食品科学**, 2022, 43(11): 29-38.
- XIA X X, XUE A L, KOU F B, et al. Analysis of color and thermodynamic properties and sugar substance basis of moisture absorption by winter jujube powder[J]. **Food Science**, 2022, 43(11): 29-38. (in Chinese)
- [26] MORALES F J, VAN BOEKEL M A J S. A study on advanced Maillard reaction in heated casein/sugar solutions [J]. **International Dairy Journal**, 1997, 7(11): 675-683.
- [27] LI Y H, WANG W J, GUO L, et al. Comparative study on the characteristics and oxidation stability of commercial milk powder during storage[J]. **Journal of Dairy Science**, 2019, 102(10): 8785-8797.
- [28] MILOVANOVIC B, DJEKIC I, MIOCINOVIC J, et al. What is the color of milk and dairy products and how is it measured?[J]. **Foods**, 2020, 9(11): 1629.
- [29] VINCENZETTI S, CECCHI T, PERINELLI D R, et al. Effects of freeze-drying and spray-drying on donkey milk volatile compounds and whey proteins stability[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2018, 88: 189-195.
- [30] LUO J, JIAN S Y, WANG P J, et al. Thermal instability and characteristics of donkey casein micelles[J]. **Food Research International**, 2019, 119: 436-443.
- [31] MIAO W L, HE R, FENG L, et al. Study on processing stability and fermentation characteristics of donkey milk[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2020, 124: 109151.
- [32] KASKOUS S. Importance of camel milk for human health[J]. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 2016, 28(3): 158.