

豆粕陈化对大豆蛋白结构性质 及腐竹制备的影响

李嘉欣, 马潇杰, 兰欣, 孔祥珍, 张彩猛, 华欲飞

(江南大学食品学院, 江苏无锡214122)

摘要:旨在为低变性豆粕制备腐竹提供参考, 分析了豆粕陈化对豆粕中蛋白质结构性质(溶解度、粒径分布、蛋白质组成)和氧化程度(巯基含量、表面疏水性、羰基含量)的影响。同时, 以新鲜豆粕和陈化豆粕为原料制备腐竹, 考察豆粕陈化对腐竹制备(产率、基本成分、机械性质、颜色、耐煮性)的影响。结果表明: 豆粕中的蛋白质在长时间储藏过程(相对湿度40%~50%, 温度16℃, 储藏时间150 d)中发生疏水聚集导致其溶解度降低, 粒径增大和蛋白质组成改变, 同时蛋白质氧化导致其游离巯基含量下降, 降低了豆粕中蛋白质的共价结合能力; 新鲜豆粕制备的腐竹在产率和蛋白质利用率上显著高于陈化豆粕, 同时在机械性质、亮度和耐煮性上也显著优于陈化豆粕。综上, 豆粕陈化导致豆粕中蛋白质的成膜能力下降, 不利于制备高产率和良好品质的腐竹。

关键词:豆粕; 陈化; 大豆; 蛋白质; 腐竹

中图分类号: TS229; TQ93

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2024)04-0103-08

Effect of soybean meal aging on the structure properties of soybean protein and the preparation of yuba

LI Jiaxin, MA Xiaojie, LAN Xin, KONG Xiangzhen, ZHANG Caimeng, HUA Yufei

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: In order to provide a reference for the preparation of yuba from low-denatured soybean meal, the effects of soybean meal aging on the protein structure properties (solubility, particle size distribution, protein composition) and oxidation degree (sulfhydryl content, surface hydrophobicity, carbonyl content) were analyzed. In addition, fresh soybean meal and aged soybean meal were used as raw materials to make yuba, and the effects of soybean meal aging on the preparation of yuba (yield, basic composition, mechanical properties, color, boiling resistance) were investigated. The results showed that the hydrophobic aggregation of protein in soybean meal during storage (relative humidity 40% - 50%, temperature 16 °C, storage time 150 d) led to the decrease of solubility, increase of particle size and change of protein composition. Protein oxidation led to a decrease in the content of free sulfhydryl, which reduced the covalent binding capacity of protein in soybean meal. The yield of yuba and utilization of protein prepared by fresh soybean meal were significantly higher than those of aged soybean meal, and the mechanical properties, brightness and boiling resistance of yuba prepared by fresh soybean meal were significantly better than those of aged soybean meal. In conclusion, the aging of soybean meal leads to the decrease of the film-forming ability of protein in soybean meal, which is not conducive to the preparation of yuba with high yield and good quality.

Key words: soybean meal; aging; soybean; protein; yuba

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-11-18

作者简介: 李嘉欣(1999), 男, 在读硕士, 研究方向为油脂与植物蛋白(E-mail) 1667004294@qq.com。

通信作者: 孔祥珍, 教授, 博士(E-mail) xzkong@jiangnan.edu.cn。

腐竹又称腐皮或豆腐皮, 是豆浆在加热过程中

于表面形成的一层主要成分为蛋白质和脂质的膜,其营养丰富,同时还含有异黄酮和卵磷脂等成分,具有改善心血管疾病等健康功效^[1]。低变性豆粕是大豆提油后经低温或闪蒸脱溶处理得到的产品,其不仅富含蛋白质,且其中的蛋白质变性程度低,水溶性较好。低变性豆粕常作为提取大豆分离蛋白、浓缩蛋白、组织蛋白的原料,还可进一步加工为大豆粉、蛋白肽、蛋白饮料、素肉等产品^[2]。Chen等^[3]报道,在85℃下持续加热无脂豆浆后发现气-液界面形成了质地良好的膜,表明蛋白质是腐竹形成最重要的因素。低变性豆粕中蛋白质含量高,因而其具有制备腐竹的潜力。与使用大豆制备腐竹的传统工艺相比,使用低变性豆粕制备腐竹无需选豆、浸豆、磨浆步骤,可节省制作时间与能耗,同时拓宽低变性豆粕的深加工和商用途径。目前,以低变性豆粕为原料制备腐竹的报道还不多见。

低变性豆粕在储藏过程中易受脂肪氧合酶的影响,使蛋白质的功能性质发生变化^[4],如:Guo等^[5]报道,热处理的豆粕在储藏8周后其蛋白质溶解度显著下降且豆粕中存在大量不可溶的蛋白质聚集体;Liu等^[6]报道,大豆在相对湿度88%、温度30℃条件下储藏8个月后,其内部蛋白质亚基完全降解并且蛋白质的溶解度、乳化性和热稳定性均显著降低。豆粕中蛋白质理化性质的变化将影响其衍生产品的品质,而低变性豆粕中蛋白质的理化性质变化对腐竹品质影响亟待探究。

本文对比了两类不同储藏时间的低变性豆粕中蛋白质的性质差异(溶解度、粒径、蛋白质组成、巯基含量和表面疏水性等),并以低变性豆粕为原料制备腐竹,进一步比较了相同工艺条件下两类低变性豆粕所制备的腐竹的性质差异(产率、机械性质、颜色和耐煮性等),旨在加深对低变性豆粕中蛋白质在储藏过程中的结构性质变化的理解,以及为低变性豆粕制备腐竹提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

低变性豆粕,山东禹王生态食品有限公司;陈化豆粕,自制,即将新鲜的低变性豆粕在湿度40%~50%,温度16℃的室内环境储藏150 d^[4]。氢氧化钠、十二烷基硫酸钠、三羟甲基氨基甲烷、尿素、5,5'-二硫代-双-(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、2,4-二硝基苯胍等,国药集团化学试剂有限公司。

腐竹锅(20 cm×20 cm×8 cm);AH-Basic II型均质机,加拿大ATS Engineering公司;Himac CR21 G II型离心机、F-7000荧光分光光度计,日本Hitachi

公司;CLXL005型高精度数显千分测厚规,浙江德清盛泰电子科技有限公司;TA-XT plus物性分析仪,英国Stable Micro System公司;UltraScan Pro1166高精度分光测色仪,美国Hunterlab公司;Zetasizer Nano ZS纳米粒径分析仪,英国Malvern Panalytical公司。

1.2 实验方法

1.2.1 豆粕中蛋白质理化指标的测定

1.2.1.1 样品处理

将豆粕磨至细粉,过0.28 mm(50目)筛。取200 g豆粕粉,与1 400 g去离子水混合,使用0.2 mol/L氢氧化钠溶液调节pH至7.0并搅匀1 h后,在8 000×g下离心20 min,收集上清液(脱脂豆浆)备用。

1.2.1.2 理化指标测定

(1)溶解度

取1 g豆粕粉,与20 mL磷酸盐缓冲溶液(PBS, 0.2 mol/L, pH 7.0)在室温(22℃)下混匀1 h,将混合液在10 000×g下离心20 min,收集上清液。测定上清液和豆粕粉中的蛋白质质量,以上清液中的蛋白质质量与豆粕粉中的蛋白质质量的比值作为蛋白质溶解度。

(2)粒径分布

参考Malaki Nik等^[7]的方法并作适当修改,测定蛋白质的粒径。使用PBS(10 mmol/L, pH 7.0)将脱脂豆浆的蛋白质含量调至1 mg/mL,取1 mL稀释的样品溶液,使用纳米粒径分析仪测定其平均粒径及粒径分布,测定条件为分散相(蛋白质)折射率1.470,分散剂(水)折射率1.330。

(3)十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)

用蒸馏水将脱脂豆浆的蛋白质含量调整至2 mg/mL,再参照吴超^[8]的方法进行还原和非还原SDS-PAGE分析。

(4)表面疏水性

根据Li等^[9]的方法使用荧光分光光度计测定蛋白质的表面疏水性。使用0.05 mol/L PBS将脱脂豆浆稀释至蛋白质含量为0.005~0.150 mg/mL,取5 mL不同稀释梯度的豆浆与20 μL 8 mol/L的1-苯胺基萘-8-磺酸(ANS)溶液混匀,在激发波长390 nm、扫描波长范围400~550 nm、激发狭缝和发射狭缝均为2.5 nm的条件下进行测定,并记录470 nm下的荧光强度。以脱脂豆浆蛋白质的质量浓度对荧光强度的曲线斜率作为蛋白质的表面疏水性。

(5) 巯基含量和总半胱氨酸含量

参考 Ou 等^[10]的方法并作适当修改,测定蛋白质的巯基含量。将 2 mL 脱脂豆浆与 18 mL 无水丙酮混匀以沉淀蛋白质,3 000 × g 下离心 15 min 分离沉淀,将沉淀氮吹风干后溶于 10 mL 含 8 mol/L 尿素的三羟甲基甲烷 - 盐酸缓冲液 (Tris - HCl, 0.05 mol/L, pH 8.0), 备用。

取 1 mL 备用液,加入 2 mL 含 8 mol/L 尿素的 Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0) 和 20 μL Ellman 试剂 [由 0.2 g DTNB 溶于 50 mL Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0) 配制], 于 25 °C 下避光反应 10 min, 以 3 mL 含 8 mol/L 尿素的 Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0) 和 20 μL Ellman 试剂作空白, 在 412 nm 下测定吸光值 (A_{412}) 并按式 (1) 计算游离巯基含量。以不含尿素的 Tris - HCl 缓冲液作缓冲体系即可测定表面巯基含量。

取 0.4 mL 备用液,加入 2 mL 含 8 mol/L 尿素的 Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0) 和 40 μL β - 巯基乙醇, 在 25 °C 下反应 1 h, 加入 20 mL 质量浓度为 12 g/100 mL 的三氯乙酸以沉淀蛋白质, 蛋白质沉淀经 3 000 × g 离心 10 min 分离后溶于 6 mL 含 8 mol/L 尿素的 Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0)。取 3 mL 溶解液, 加入 50 μL Ellman 试剂, 于 25 °C 避光反应 10 min, 以 3 mL 含 8 mol/L 尿素的 Tris - HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.0) 和 50 μL Ellman 试剂作空白, 在 412 nm 下测定吸光值 (A_{412}) 并按式 (1) 计算总半胱氨酸含量。

巯基含量和总半胱氨酸含量的计算见公式 (1)。

$$S = \frac{73.53 A_{412} D}{C} \quad (1)$$

式中: S 为巯基含量或总半胱氨酸含量, μmol/g (以蛋白质质量为基准); D 为稀释倍数; C 为蛋白质含量, mg/mL。对于巯基含量, $D = 15.1$; 对于总半胱氨酸含量, $D = 76.25$ 。

(6) 羰基含量

参照 Levine 等^[11]的方法测定蛋白质的羰基含量。使用 0.05 mol/L PBS (pH 7.0) 将脱脂豆浆的蛋白质含量调整为 5 mg/mL。取 500 μL 稀释的脱脂豆浆, 与等体积 0.01 mol/L 2,4 - 二硝基苯肼 (DNPH, 2 mol/L 盐酸配制) 溶液在 30 °C 下避光反应 1 h, 向反应体系中加入 20 g/100 mL 三氯乙酸溶液以沉淀蛋白质, 离心分离沉淀并使用乙醇 - 乙酸乙酯清洗沉淀, 使用 6 mol/L 盐酸胍在 37 °C 下溶解沉淀 1 h, 然后以 500 μL 样品与等体积不含 DNPH

的 2 mol/L 盐酸的混合溶液为空白, 在 370 nm 下测定吸光值 (A_{370})。羰基含量的计算见公式 (2)。

$$c = \frac{106A_{370}}{wKb} \quad (2)$$

式中: c 为羰基含量, μmol/g (以蛋白质质量为基准); w 为脱脂豆浆的蛋白质含量, mg/mL; K 为摩尔吸光系数, 22 000 mol⁻¹ · L⁻¹ · cm⁻¹; b 为吸收层厚度, 1 cm。

1.2.2 腐竹的制备

向脱脂豆浆中加入适量大豆油 (蛋白质与大豆油质量比值为 2.83), 在 14 000 r/min 下剪切 2 min, 然后在 40 MPa 下均质, 再在 95 °C 下加热 10 min, 将熟浆液转移至腐竹锅。取 1 050 g 熟浆液用于制备腐竹, 浆液温度控制在 88 °C, 每 20 min 获取 1 张腐竹, 共获取 10 张。以偶数张腐竹代表整批腐竹。每获取一张湿腐竹立即使用保鲜膜密封并置于 4 °C 冰箱保存。

1.2.3 熟浆液及腐竹基本成分的测定

水分, 按照 GB 5009.3—2016 中直接干燥法进行测定; 蛋白质, 按照 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法进行测定; 脂肪, 按照 GB 5009.6—2016 中酸水解法进行测定; 灰分, 按照 GB 5009.4—2016 测定; 固形物, 由 1 减水分含量获得; 总糖, 由固形物含量减去蛋白质、脂肪和灰分的干基含量获得。

1.2.4 腐竹产率及熟浆液蛋白质、脂肪利用率的测定

为尽可能利用熟浆液中的蛋白质和脂肪, 采用加水 and 短时揭腐竹的方式延长揭腐竹时间以测定腐竹产率。参考季秋燕^[12]的方法并作适当修改, 测定腐竹的产率。取 1 050 g 熟浆液用于制备腐竹, 浆液温度控制在 88 °C, 每 8 min 获取一张腐竹, 每获取 3 张腐竹向腐竹锅中加入 100 mL 去离子水以维持浆液固形物含量为 7.0% 左右。重复此操作, 直至无法获取一张完整的腐竹, 认定为腐竹产率测定结束。腐竹产率及熟浆液蛋白质、脂肪利用率分别见公式 (3) 和公式 (4)。

$$Y = \frac{m}{\omega M} \times 100 \quad (3)$$

$$U = \frac{cm}{CM} \times 100 \quad (4)$$

式中: Y 为腐竹产率, %; ω 为熟浆液固形物含量; m 为腐竹干基质量, g; M 为熟浆液质量, g; U 为熟浆液的蛋白质或脂肪利用率, %; c 为腐竹的蛋白质或脂肪含量 (干基); C 为熟浆液蛋白质或脂肪含量。

1.2.5 腐竹品质指标的测定

1.2.5.1 机械性质

参照季秋燕等^[13]的方法测定腐竹的机械性质。将腐竹切为 2 cm × 7 cm 的长条,在饱和 BaCl₂ 溶液的恒湿环境(相对湿度 90%, 22 °C)中平衡水分 24 h 后,使用高精度数显千分测厚规随机测定腐竹条上的 5 点厚度,取平均值代表该条腐竹厚度。在初始距离 4 cm、拉伸距离 8 cm、测前速度 1 mm/s、测中速度 1 mm/s、测后速度 5 mm/s、促发力 5 g 的条件下测定腐竹的抗拉强度和断裂延伸率,每张腐竹重复测定 7 次,结果取平均值。

1.2.5.2 颜色

参照季秋燕等^[13]的方法测定腐竹的颜色,以 L^* 、 a^* 、 b^* 表示,其中: L^* 代表亮度, a^* 代表红度, b^* 代表黄度。将腐竹烘干脱水后磨成细粉装入自封袋并用高精度分光测色仪随机选取 7 点进行测定,结果取平均值。

1.2.5.3 蒸煮损失

参考 Zhang 等^[14]的方法并作适当修改,测定腐竹的蒸煮损失。将腐竹切为 2 cm × 7 cm 的长条,置于 100 mL 的沸水中煮沸 2.5 min,将煮出液过 0.88 mm(18 目)筛网,已蒸煮的腐竹用去离子水润洗并将润洗液与煮出液合并,将煮出液稀释至 200 mL,准确移取 40 mL 煮出液于 105 °C 干燥过夜。收集已蒸煮的腐竹并干燥。腐竹蒸煮损失率及各成分的蒸煮损失程度计算分别见公式(5)和公式(6)。

$$L = \frac{m}{m_0(1-w)} \times 5 \times 100 \quad (5)$$

式中: L 为腐竹蒸煮损失率,%; m 为煮出液的干基质量,g; m_0 为腐竹的质量,g; w 为腐竹的水分含量。

$$D = \left(1 - \frac{(1-L)N_1}{N_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

式中: D 为腐竹干基中蛋白质、脂肪或总糖的蒸煮损失,%; N_0 为蒸煮前腐竹干基中蛋白质、脂肪或总糖的含量,%; N_1 为蒸煮后腐竹干基中蛋白质、脂肪或总糖的含量,%。

1.2.6 数据处理

实验结果均由 3 次重复实验得到,并以“平均值 ± 标准差”的形式表示。数据使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(ANOVA),对同一实验指标下的所有组别数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 豆粕中蛋白质的理化性质

2.1.1 结构性质

在储藏过程中豆粕蛋白质理化性质的改变通常

涉及蛋白质的变性、聚集或氧化等过程^[15]。经测定,新鲜豆粕中蛋白质的溶解度(69.7%)显著高于陈化豆粕(51.5%)。新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的粒径分布如图 1 所示。

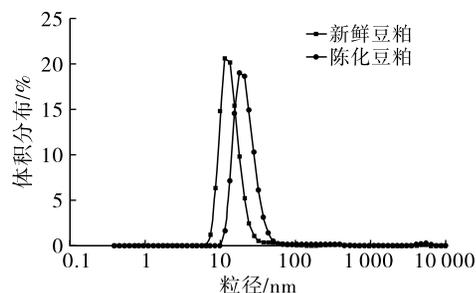


图 1 新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的粒径分布

由图 1 可知,新鲜豆粕中蛋白质的平均粒径(23.2 nm)显著低于陈化豆粕(57.1 nm),且后者粒径分布范围在粒径上偏向更大方向。这可能是因为在储存过程中豆粕中蛋白质出现部分聚集,导致其粒径增大以及溶解度下降。

在电泳样品浓度一致的前提下,电泳图谱中蛋白质条带的数目和颜色深浅反映蛋白质种类和含量。新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的非还原和还原电泳图谱如图 2 所示。

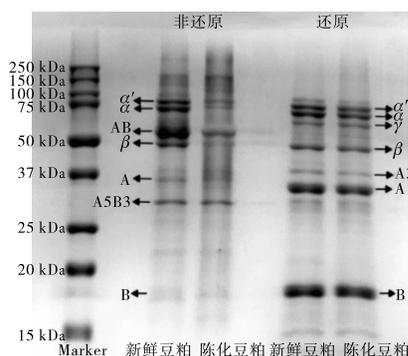


图 2 新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的非还原电泳和还原电泳图谱

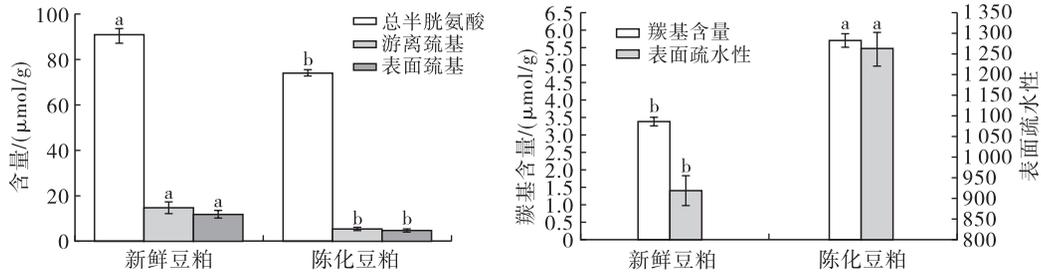
由图 2 可见,在非还原电泳图谱中,陈化豆粕中分子质量 75 kDa 以上和 25 ~ 37 kDa 之间(如 11S 的 A 肽链)的蛋白质条带浓度高于新鲜豆粕的,同时在 37 ~ 75 kDa 之间的蛋白质条带(主要是 7S 的 α' 、 α 和 β 亚基及 11S 的 AB 肽链)浓度低于新鲜豆粕的,推测豆粕中 11S 的 AB 肽链在储藏过程中断裂为 A 肽链和 B 肽链,7S 和 11S 中疏水性较强的 B 肽链发生聚集形成分子质量更大的聚集体,而 11S 中亲水性较强的 A 肽链则游离存在。在还原电泳图谱中,两类豆粕中的蛋白质条带数目一致,且新鲜豆粕中蛋白质条带浓度略高于陈化豆粕的。对比非还原电泳图谱与还原电泳图谱(分子质量 100 kDa

以上区域),推测二硫键参与了蛋白质聚集体的形成。Martins等^[16]报道,豆粕在储藏过程中已形成的不可溶蛋白质聚集体可能不会参与蛋白质热凝胶的形成。Chen等^[3, 17]报道,豆浆中蛋白质颗粒最具成膜能力且其疏水核心主要由7S的 β 亚基和11S的B肽链构成。Ding等^[18]报道,在制备腐竹过程中豆浆内7S的 β 亚基和11S的B肽链较其他亚基含量降低更为明显。由此推测,豆粕陈化时间与蛋

白质的聚集程度呈正相关,而蛋白质聚集程度影响能够参与腐竹成膜的蛋白质亚基含量(特别是7S的 β 亚基和11S的B肽链),进而影响蛋白质的成膜成凝胶能力,最终影响腐竹的品质(产率、质构等)。

2.1.2 氧化程度

新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的巯基含量、表面疏水性和羰基含量如图3所示。



注:同一指标不同字母表示组间比较具有显著性差异($p < 0.05$)

图3 新鲜豆粕和陈化豆粕中蛋白质的巯基含量、表面疏水性和羰基含量

由图3可知,陈化豆粕中总半胱氨酸含量显著低于新鲜豆粕,这是因为在长时间的储藏过程中豆粕蛋白质中的部分-SH基团发生氧化形成亚硫酸或亚磺酸而损失^[19]。另外,陈化豆粕中蛋白质的游离巯基含量和表面巯基含量均显著低于新鲜豆粕,说明豆粕蛋白质在储藏过程中的共价结合能力呈现下降趋势。

由图3还可知,陈化豆粕中蛋白质的表面疏水性显著高于新鲜豆粕,这表明在储藏过程中豆粕中蛋白质内部疏水区域倾向于展开。固体条件下蛋白质分子移动受限,而疏水区域的展开客观上有利于

蛋白质分子间的疏水相互作用并促进蛋白质聚集体的形成。羰基含量是反映蛋白质氧化程度的重要指标。本研究中,陈化豆粕中蛋白质的羰基含量(5.72 $\mu\text{mol/g}$)显著高于新鲜豆粕(3.38 $\mu\text{mol/g}$),说明在储藏过程中豆粕中蛋白质氧化程度有加深的趋势。

2.2 豆粕陈化对腐竹产率的影响

新鲜豆粕和陈化豆粕所制备的熟浆液基本组成如表1所示,所制备的腐竹产率及熟浆液蛋白质、脂肪利用率如表2所示。

表1 熟浆液的基本组成

原料	固形物	蛋白质	脂肪	总糖	灰分
新鲜豆粕	7.43 \pm 0.04 ^b	3.64 \pm 0.05 ^a	1.21 \pm 0.01 ^a	2.09 \pm 0.04 ^a	0.49 \pm 0.03 ^b
陈化豆粕	7.48 \pm 0.02 ^a	3.61 \pm 0.02 ^a	1.28 \pm 0.10 ^a	2.03 \pm 0.04 ^b	0.56 \pm 0.02 ^a

注:同列不同字母表示具有显著性差异($p < 0.05$)。下同

表2 腐竹产率及熟浆液蛋白质、脂肪利用率 %

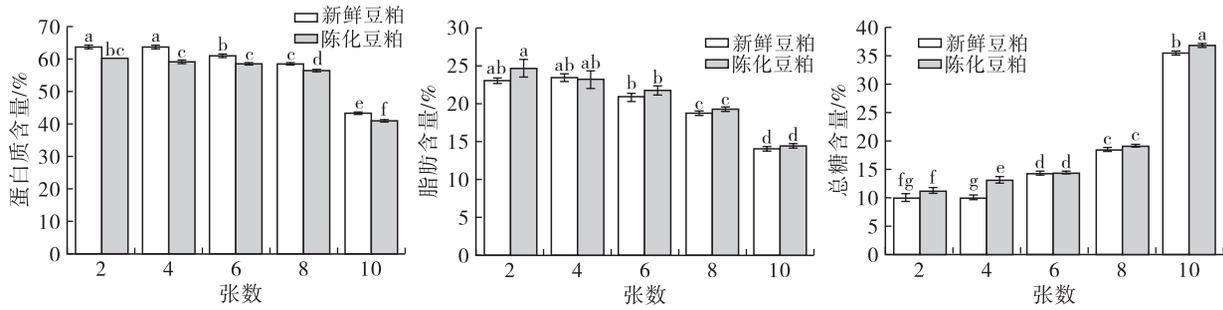
原料	产率	蛋白质利用率	脂肪利用率
新鲜豆粕	57.15 \pm 0.21 ^a	67.49 \pm 0.23 ^a	72.71 \pm 1.07 ^a
陈化豆粕	51.72 \pm 0.40 ^b	64.42 \pm 0.41 ^b	72.35 \pm 2.38 ^a

由表1、表2可见,新鲜豆粕和陈化豆粕所制备的熟浆液在蛋白质和脂肪含量上无显著性差异,固形物含量上的差异主要来自于总糖含量和灰分含量。新鲜豆粕所制备的腐竹产率(57.15%)显著高于陈化豆粕(51.72%),新鲜豆粕的浆液蛋白质利用率(67.49%)也显著高于陈化豆粕(64.42%),但

两类豆粕在浆液脂肪利用率上无显著性差异。结果说明豆粕储藏时间显著影响腐竹的产率和浆液的蛋白质利用率,且新鲜豆粕中蛋白质的成膜能力显著优于陈化豆粕,造成此差异的原因主要在于新鲜豆粕和陈化豆粕中的蛋白质在组成和巯基含量上存在显著性差异。

2.3 豆粕陈化对腐竹组成的影响

以偶数张腐竹的基本组成代表整批腐竹的基本组成,新鲜豆粕和陈化豆粕所制备腐竹的基本成分(干基)变化如图4所示。



注:不同字母表示组内组间比较具有显著性差异($p < 0.05$)。下同

图4 腐竹的蛋白质、脂肪和总糖干基含量

由图4可见,在腐竹制备过程中,腐竹的蛋白质和脂肪含量逐渐下降而总糖含量逐渐增加,该现象可通过扩散理论^[20]较好地解释。新鲜豆粕所制备的腐竹的蛋白质含量(63.6%~43.5%)在相同张数下高于陈化豆粕所制备腐竹的(60.2%~41.0%);总体上,两类豆粕所制备的腐竹的脂肪含量和总糖含量在相同张数下无显著性差异。总糖含

量在第10张腐竹中急剧增加,推测该现象与脱脂豆粕中碳水化合物大量溶出以及其在腐竹制备过程中更易于保留在剩余浆液中的特性相关。

2.4 豆粕陈化对腐竹品质的影响

2.4.1 对膜厚与机械性质的影响

新鲜豆粕和陈化豆粕所制备的腐竹的机械性质如图5所示。

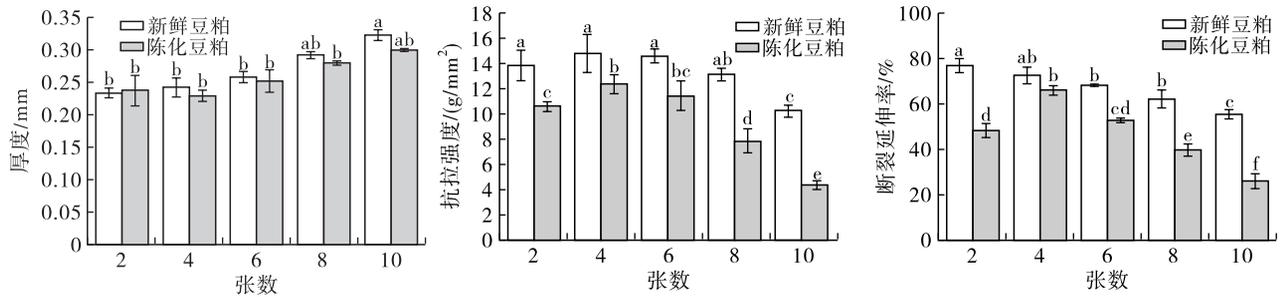


图5 腐竹的厚度、抗拉强度和断裂延伸率

由图5可见:在腐竹制备过程中,腐竹的厚度逐渐增加,在相同张数下,新鲜豆粕所制备的腐竹厚度与陈化豆粕的不具有显著性差异;腐竹的抗拉强度随腐竹制备的进行先略增加后下降,且表现为新鲜豆粕制备的腐竹抗拉强度(10.31~14.83 g/mm²)在相同张数下显著高于陈化豆粕(4.35~12.46 g/mm²)的趋势;在腐竹制备过程中,陈化豆粕制备的腐竹其断裂延伸率同样表现为先增加后下降,而新鲜豆粕制备的腐竹其断裂延伸率随腐竹制备的进行呈现下降趋势,且新鲜豆粕所制备的腐竹其断裂

延伸率(55.66%~77.22%)在相同张数下显著高于陈化豆粕(25.81%~66.19%)。综上,陈化豆粕所制备的腐竹其机械性质在相同张数下显著劣于新鲜豆粕的。在熟浆液蛋白质和脂肪含量无显著性差异的前提下(表1),两类豆粕所制备的腐竹在机械性质上的差异主要来自于豆粕中蛋白质成膜能力的差异。

2.4.2 对颜色的影响

新鲜豆粕和陈化豆粕所制备的腐竹的颜色如图6所示。

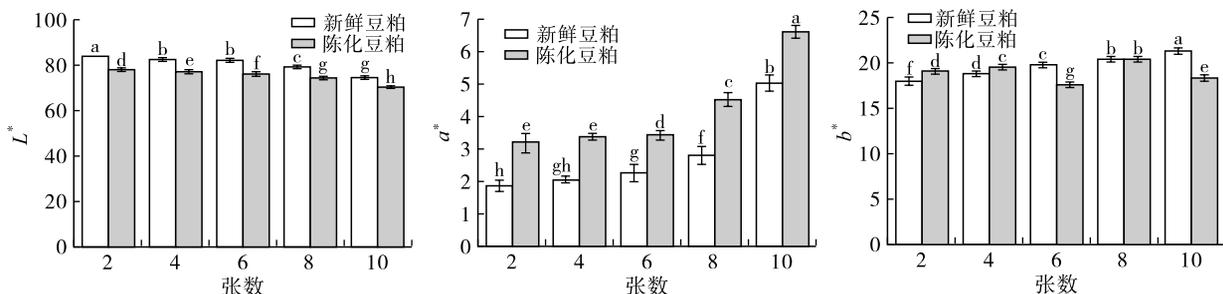


图6 腐竹的 L^* 、 a^* 和 b^*

由图6可知,在腐竹制备过程中,腐竹的 L^* 逐渐下降, a^* 逐渐增加,而对于 b^* ,新鲜豆粕所制备的腐竹表现为逐渐增加,陈化豆粕则表现为波动变化趋势。腐竹制备过程中的美拉德反应导致后期腐竹颜色偏黯红色^[18]。在相同张数下新鲜豆粕制备的腐竹 L^* 显著高于陈化豆粕,而 a^* 则表现出相反

的趋势。本研究说明豆粕陈化显著影响其所制备的腐竹的颜色,与Shih等^[21]的结论相似。

2.4.3 对蒸煮损失的影响

新鲜豆粕和陈化豆粕所制备的腐竹的蒸煮损失率及各成分的蒸煮损失程度如表3所示。

表3 腐竹的蒸煮损失率及各成分的蒸煮损失程度

原料	张数	蒸煮损失率/%	蛋白质损失/%	脂肪损失/%	总糖损失/%
新鲜豆粕	2	34.21 ± 0.70 ^e	35.02 ± 0.73 ^d	15.46 ± 0.96 ^d	63.92 ± 0.41 ^f
	6	35.77 ± 0.03 ^e	33.07 ± 0.03 ^d	14.29 ± 0.04 ^d	74.02 ± 0.01 ^e
	10	62.59 ± 1.23 ^b	47.22 ± 1.74 ^b	31.31 ± 2.26 ^b	89.75 ± 0.34 ^b
陈化豆粕	2	43.30 ± 0.59 ^d	41.88 ± 0.60 ^c	25.44 ± 0.77 ^c	84.57 ± 0.16 ^d
	6	48.06 ± 0.40 ^c	45.82 ± 0.04 ^b	25.32 ± 0.05 ^c	86.54 ± 0.01 ^c
	10	75.51 ± 0.31 ^a	65.51 ± 0.44 ^a	45.04 ± 0.70 ^a	96.12 ± 0.05 ^a

腐竹的蒸煮损失率越低对应耐煮性越优。由表3可见,在腐竹制备过程中,腐竹的蒸煮损失率逐渐增加且在制备后期(第10张)急剧增加,前、中期获得的腐竹(第6张前)耐煮性良好而后期的腐竹耐煮性劣变。陈化豆粕制备的腐竹蒸煮损失率(43.30%~75.51%)在相同张数下显著高于新鲜豆粕(34.21%~62.59%)。结果说明豆粕陈化显著影响其制备的腐竹的耐煮性,这可能是由于新鲜豆粕制备的腐竹较陈化豆粕制备的腐竹蛋白网络结构更加致密且稳固,因而在强烈的蒸煮作用下其损失程度更低。

由表3还可知,腐竹中各成分的蒸煮损失程度的变化趋势与蒸煮损失率相似。在腐竹制备过程中,腐竹中蛋白质、脂肪和总糖的蒸煮损失程度均增加,且总糖的蒸煮损失程度最高,蛋白质次之,而脂肪的蒸煮损失程度最低。该现象与浆液中各成分参与腐竹形成能力的差异相关^[20],碳水化合物不具备成膜能力,在蒸煮过程中最易损失,蛋白质构成腐竹的“骨架”,油滴则嵌入蛋白网络结构中^[20]。另外,新鲜豆粕和陈化豆粕制备的腐竹在各成分的蒸煮损失程度上也存在显著性差异。陈化豆粕所制备的腐竹在相同张数上的蛋白质、脂肪和总糖的蒸煮损失程度均显著高于新鲜豆粕。这是因为新鲜豆粕中蛋白质成膜能力更强,其所制备的腐竹蛋白网络结构更加致密和稳固,耐煮性更优,在相同蒸煮过程中减少了蛋白质、脂肪和总糖的损失。

3 结论

豆粕中蛋白质在长时间储藏过程中因疏水相互作用发生过度聚集导致其粒径增大,溶解度降低,同时,蛋白质氧化程度增加导致其蛋白质游离巯基含量降低,不利于蛋白质间共价结合作用。此外,豆粕

中蛋白质组成也因为聚集而改变,豆粕中蛋白质结构性质的改变影响其成膜能力,新鲜豆粕制备的腐竹在产率、熟浆液蛋白质利用率和蛋白质含量上显著高于陈化豆粕。蛋白质成膜能力的差异导致腐竹蛋白网络结构的差异,新鲜豆粕制备的腐竹在机械性质和耐煮性上均优于陈化豆粕。因此,在实际生产中,应关注豆粕储藏对其蛋白质品质的影响,进而实现豆粕的高效利用。

参考文献:

- [1] 张伟,邱楠,杨红萍,等.成膜条件对腐竹品质的影响研究[J].食品科技,2021,46(1):105-112.
- [2] 李大纶,张羽春,马玉梅,等.食用低变性脱脂大豆粕(白豆片)及其在大豆蛋白生产上的延伸[J].黑龙江粮食,1995(3):61-62.
- [3] CHEN Y, ONO T. The mechanisms for yuba formation and its stable lipid[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(10): 6485-6489.
- [4] 陈力扬.原料豆粕陈化和加热预变性对大豆蛋白结构和凝胶性质的影响[D].江苏无锡:江南大学,2019.
- [5] GUO F X, XIONG Y L, QIN F, et al. Examination of the causes of instability of soy protein isolate during storage through probing of the heat-induced aggregation[J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(8): 1075-1084.
- [6] LIU C, WANG X S, MA H, et al. Functional properties of protein isolates from soybeans stored under various conditions[J]. Food Chem, 2008, 111(1): 29-37.
- [7] MALAKINIK A, TOSH S M, WOODROW L, et al. Effect of soy protein subunit composition and processing conditions on stability and particle size distribution of soymilk[J]. LWT - Food Sci Technol, 2009, 42(7): 1245-1252.
- [8] 吴超.大豆蛋白凝胶结构与非网络蛋白扩散行为或网络蛋白性质关系的研究[D].江苏无锡:江南大学,2017.

(下转第131页)

参考文献:

- [1] 杨丽萍,郭咪咪,段章群.天然抗氧化剂迷迭香提取物在食用植物油中的应用研究进展[J].粮油食品科技,2022,30(2):95-100.
- [2] 杜纪权,徐宏,曹庸,等.迷迭香提取物的抗氧化特性及应用中存在的问题[J].食品工业科技,2011,32(7):467-469,473.
- [3] GINSBURG S R, MALEKY F. Extraction of lipid-soluble antioxidants from rosemary leaves using vegetable oils[J]. Int J Food Sci Tech, 2020,55: 3135-3144.
- [4] 王莹,杨梦男,曾祥辉,等.迷迭香抗氧化剂在花生油中的复配筛选及货架期模型构建[J].中国粮油学报,2023,38(6):92-97.
- [5] 李维正,杨丽华,韩玲,等.果胶-迷迭香精油复合膜协同冰温贮藏对牛肉保鲜的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(20):146-151.
- [6] 邓金良,刘玉兰,肖天真,等.不同抗氧化剂对花生油和大豆油氧化稳定性及预测货架期的影响[J].中国油脂,2019,44(8):35-40.
- [7] 王莹,邓慧,曾祥辉,等.迷迭香脂溶性复配抗氧化剂对花生油煎炸过程品质的影响[J].中国油料作物学报,2023,45(3):637-642.
- [8] 李鹏娟.迷迭香源抗氧化剂对薯条煎炸油品质的影响研究[D].广州:暨南大学,2020.
- [9] 张国馥,郜山保,王娟娟,等.浅析油脂精炼技术:吸附脱色[J].粮食与油脂,2011(11):28-30.
- [10] 罗凡,费学谦,方学智,等.脱色工艺中不同脱色剂对油茶籽油中苯并芘脱除效果的影响[J].中国油脂,2012,37(6):47-50.
- [11] 牛玉芝,屈凌波,肖咏梅,等.响应面法优化黄连木油脱色工艺研究[J].中国油脂,2012,37(10):19-22.
- [12] 周海荣.瓜蒌籽油脱色及其色素的提取、纯化和鉴定[D].合肥:安徽农业大学,2017.
- [13] 刘元法,王兴国,金青哲,等.油脂脱色过程中吸附剂对色素及微量成分的影响[J].中国油脂,2005,30(2):25-27.
- [14] 宋晓寒,王会.玉米油的营养功能及提取工艺[J].食品安全导刊,2018(21):135-136.
- [15] 王莹,曾祥辉,黄大川,等.迷迭香脂溶性抗氧化剂提取工艺的优化研究[J].中国油脂,2020,45(9):72-76.
- [16] 宋明发,刘晓燕,章乾,等.响应面法优化山桐子油脱色工艺[J].中国油脂,2021,46(5):14-18.
- [17] 彭彰文,马添,马浩瑞,等.山核桃油脱色工艺及脱色效果研究[J].农产品加工,2017(10):30-33,43.
- [18] 韩玉泽,李柠,万松涛,等.响应面法优化青海胡麻籽油脱色工艺[J].粮油食品科技,2020,28(4):113-118.
- [19] 陈焱,尤梦圆,翟孟婷,等.大豆油活性白土脱色影响因素[J].中国油脂,2021,46(7):23-26.
- [20] 李冯程,金文闻,张永强,等.冷榨油茶籽毛油脱胶与脱色工艺研究[J].食品安全质量检测学报,2021,12(7):2728-2737.
- [9] LI Y, WAN Y L, MAMU Y, et al. Protein aggregation and Ca^{2+} -induced gelation of soymilk after heat treatment under slightly alkaline conditions [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 124: 107274 [2022-12-30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107274>.
- [10] OU S Y, KWOK K C, WANG Y, et al. An improved method to determine SH and -S-S- group content in soymilk protein[J]. Food Chem, 2004, 88(2): 317-320.
- [11] LEVINE R L, GARLAND D, OLIVER C N, et al. Determination of carbonyl content in oxidatively modified proteins[J]. Methods Enzymol, 1990, 186: 464-478.
- [12] 季秋燕.通过制浆工艺及谷氨酰胺转氨酶作用改良腐竹品质的研究[D].江苏无锡:江南大学,2019.
- [13] 季秋燕,孔祥珍,华欲飞.无氧磨浆工艺对腐竹品质的影响[J].食品与机械,2019,35(6):177-181.
- [14] ZHANG S R, LEE J, KIM Y. Chemical composition, water vapor permeability, and mechanical properties of yuba film influenced by soymilk depth and concentration [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(5): 1751-1756.
- [15] 谢丽燕.腐竹生产工艺及影响因素研究[D].南宁:广西大学,2014.
- [16] MARTINS V B, NETTO F M. Physicochemical and functional properties of soy protein isolate as a function of water activity and storage [J]. Food Res Int, 2006, 39(2): 145-153.
- [17] CHEN Y M, ONO T. Protein particle and soluble protein structure in prepared soymilk [J]. Food Hydrocolloid, 2014, 39: 120-126.
- [18] DING Y Y, LI J, WU C, et al. The relationship between the chemical composition and the quality of the soybean film during peeling process [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(9): 4944-4956.
- [19] GUO F X, LIN L, HE Z Y, et al. Storage stability of soy protein isolate powders containing soluble protein aggregates formed at varying pH [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(10): 5275-5283.
- [20] CHEN Y, YAMAGUCHI S, ONO T. Mechanism of the chemical composition changes of yuba prepared by a laboratory processing method [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(9): 3831-3836.
- [21] SHIH M C, HWANG T S, CHOU H Y. Physicochemical and functional property changes in soy protein isolates stored under high relative humidity and temperature [J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(1): 902-908.

(上接第109页)