

超声辅助NaCl浸泡对熟化黑豆结构和消化特性的影响

胡秀发, 陈燕美, 张喜玲, 顾辰琦, 李 曼, 宁阳阳, 关伟超, 郑婵敏, 董茗洋, 胡 蝶, 杨庆余

Structure and Digestive Qualities of Cooked Black Beans after Soaked in NaCl with the Assistance of Ultrasound

HU Xiufa, CHEN Yanmei, ZHANG Xiling, GU Chenqi, LI Man, NING Yangyang, GUAN Weichao, ZHENG Chanmin, DONG Mingyang, HU Die, and YANG Qingyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析

Ultrasonic-microwave Assisted Enzymatic Extraction of Water-soluble Dietary Fiber from Black Soybean Hull and Its Physicochemical Properties

食品工业科技. 2020, 41(6): 8-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.002>

浸泡处理对大米淀粉糊化特性及流变特性的影响

Effect of Soaking Treatment on the Gelation Properties of Rice Starch

食品工业科技. 2018, 39(18): 50-54,59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.18.010>

黑豆渣粉对饼干品质的影响研究

Effect of black bean dregs powder on the quality of biscuits

食品工业科技. 2017(20): 152-158 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.20.028>

超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响

Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Millet Starch

食品工业科技. 2021, 42(24): 60-67 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040127>

浸泡和微波处理对三种高粱熟化的影响

Effects of Soaking and Microwave Treatments on Cultivability of Three Kinds of Sorghums

食品工业科技. 2021, 42(8): 70-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070103>

不同直链淀粉含量玉米淀粉挤出物的酶解力与糊化度研究

Enzymatic hydrolysis and gelatinization degree of extruded corn starch with different amylose content

食品工业科技. 2018, 39(10): 1-6 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.10.001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡秀发, 陈燕美, 张喜玲, 等. 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆结构和消化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 121–127.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070069

HU Xiufa, CHEN Yanmei, ZHANG Xiling, et al. Structure and Digestive Qualities of Cooked Black Beans after Soaked in NaCl with the Assistance of Ultrasound[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 121–127. (in Chinese with English abstract).
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070069

· 研究与探讨 ·

超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆结构和消化特性的影响

胡秀发¹, 陈燕美¹, 张喜玲¹, 顾辰琦¹, 李 曼¹, 宁阳阳², 关纬超³, 郑婵敏³, 董茗洋¹, 胡 蝶¹, 杨庆余^{1,*}

(1. 沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034;

2. 辽宁省粮食和物资储备事务服务中心, 辽宁沈阳 110001;

3. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

摘 要: 为探究超声辅助 NaCl 浸泡对黑豆的结构和消化特性的影响规律, 采用扫描电镜、红外光谱、X 射线衍射等分析 NaCl 对黑豆结构的作用机制, 利用热特性、吸水率、膨胀率等明确黑豆熟化过程性质的变化, 并分析淀粉体外消化特性。结果表明, 超声辅助 NaCl 浸泡后的黑豆粉颗粒致密度降低, 颗粒之间间隙变大, 抑制了淀粉结晶区域损伤。随着 NaCl 浓度的升高, 黑豆颗粒的膨胀率比清水浸泡升高了 28%、48%、56%, 硬度明显下降, 糊化度升高至 40%、43%、45%, 黑豆淀粉水解率分别下降到 19.05%、17.93%、17.48%。以上结果说明钠离子可抑制淀粉消化, 本研究 NaCl 浸泡处理可为开发低 GI 黑豆食品奠定理论基础。

关键词: 黑豆, 膨胀率, 糊化度, 淀粉水解率, NaCl 浸泡, 超声

中图分类号: TS214.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0121-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070069



本文网刊:

Structure and Digestive Qualities of Cooked Black Beans after Soaked in NaCl with the Assistance of Ultrasound

HU Xiufa¹, CHEN Yanmei¹, ZHANG Xiling¹, GU Chenqi¹, LI Man¹, NING Yangyang², GUAN Weichao³,
ZHENG Chanmin³, DONG Mingyang¹, HU Die¹, YANG Qingyu^{1,*}

(1. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

2. Liaoning Provincial Grain and Material Reserve Service Center, Shenyang 110001, China;

3. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: To investigate the effect of ultrasound assisted NaCl soaking on the structure and digestive characteristics of black beans, the scanning electron microscopy, infrared spectroscopy analysis, X-ray diffraction and other methods were used to analyze the mechanism of NaCl on the structure of black beans. And the thermal properties, water absorption, and swelling rate were used to clarify the changes in the properties of the black beans during the ripening process, and the *in vitro* digestive properties of starch were analyzed. The results showed that ultrasound-assisted NaCl soaking decreased the densification of black bean powder particles and made the gap between particles larger while reducing the damage to the starch crystallization region. With the increase of NaCl concentration, the swelling rate of black bean particles increased by 28%, 48%, and 56% compared to water soaking, and the hardness significantly decreased. The gelatinization degree increased to 40%, 43%, and 45%, and the hydrolysis rate of black bean starch decreased to 19.05%, 17.93%, and 17.48%.

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划乡村产业共性关键技术研发与集成应用项目 (2021YFD1600600); 辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目 (2022020641-JH1/109); 2023 年度辽宁省教育厅基本科研项目重点攻关项目 (JYTZD2023185); 辽宁省科技特派团项目 (1685513630741); 大学生创新创业训练计划项目 (20221002)。

作者简介: 胡秀发 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮油精深加工与综合利用, E-mail: 1073667600@qq.com。

*** 通信作者:** 杨庆余 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物源食品开发与综合利用, E-mail: yangqy0311@163.com。

respectively. This indicated that sodium ions could inhibit starch digestion, the NaCl soaking treatment in this study would provide a theoretical basis for the development of low GI functional foods.

Key words: black beans; expansion ratio; pasting degree; starch hydrolysis rate; NaCl soaking; ultrasound

黑豆是豆科植物大豆的黑色种子,富含丰富的蛋白质、淀粉、脂肪、维生素、卵磷脂、黑色素等营养物质^[1]。黑豆的微量元素中,维生素B和维生素E的含量较高,可以降低血液中胆固醇水平^[2]。黑豆中含有大量的抗性淀粉(RS)、慢性消化淀粉^[3](SDS)和易消化淀粉^[4],可以预防和治疗代谢综合征、II型糖尿病和冠心病等慢性疾病^[5]。黑豆中脂肪主要为不饱和脂肪酸。人体对不饱和脂肪酸的消化率高达95%。黑豆具有较强的适应性,可以在干旱的盐碱地上生长^[6],在我国黑龙江、南海、东海和新疆、陕西、山西等地分布广泛。超声波是一种弹性的机械振荡波,具有波长短、近似直线传播等特点^[7]。超声波在固体和液体环境条件下比电磁波衰减更小,能形成高强度声场并产生剧烈震动^[8],超声可加速离子在溶液中的运动速度^[9]。经过热处理后,可消除黑豆部分抗营养因子,增加香气值,去除豆腥味,同时还能改善产品外观和适口性,提高利用率。

NaCl是一种效果较好的抗褐变剂,已在鲜切苹果、鲜切马铃薯等果蔬中应用^[10]。Zhi等^[11]研究表明,钠离子存在的情况下,抗性淀粉表面正电荷会增加,可能会改善它们与带负电酶位点的静电相互作用,NaCl浸泡会降低淀粉消化率。但是对于NaCl浸泡处理对黑豆结构和消化特性的作用和机理研究鲜有报道,因此本研究从NaCl浸泡影响黑豆结构和消化特性出发,从多角度探究NaCl对黑豆结构和消化特性的机理。

本研究采用超声辅助NaCl浸泡黑豆,探究超声辅助NaCl浸泡对黑豆结构和性质的影响规律,揭示处理后黑豆的结构和消化特性之间的关联机制,为黑豆低升糖食品的综合利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑豆 市售; α -淀粉酶(4000 U/g) 枣庄全鼎生物科技有限公司;盐酸 黄骅市鑫盛化工有效公司;NaCl 廊坊鹏彩有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS) 北京酷来博科技有限公司;以上试剂均为分析纯。

TENSON II 傅里叶变换红外光谱仪 德国Bruker公司;X'pert pro X-射线衍射仪 荷兰帕纳科公司;NHITACHIS-4800 扫描电子显微镜 日本日立高科技公司;DSC-Q20 差示扫描量热仪 美国TA仪器公司;CT3-4500型质构仪 美国博勒飞公司;BSA224S-CW型电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司;FW80型粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司;GFL-125型热风干燥机 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司;722型紫外可见分光光度计 上海

佑科仪器仪表有限公司;HH-6型数显恒温水浴锅 上海皓庄仪器有限公司;SB-25-12DT 超声清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 挑选大小均一、颗粒饱满的黑豆,准确称取黑豆样品 30.00 g。将黑豆清洗干净,用吸水纸擦干表面水分,将称好的黑豆分别置于 0%、1%、3%、5%(m/v)的 NaCl 溶液中,将其放置于超声设备中超声处理,料液比为 1:3 (g/mL),浸泡温度 45 ℃,超声条件为:超声功率 400 W,超声时间 8 h。将超声浸泡后的黑豆置于沸水中蒸煮 30 min,在 45 ℃ 条件下烘干 12 h,直至样品干燥。将黑豆样品置于粉碎机中粉碎,过 100 目筛得到黑豆粉备用。0%、1%、3%、5%(m/v)的 NaCl 溶液浸泡的黑豆分别表示为 BB-0、BB-1、BB-3、BB-5。

1.2.2 傅里叶红外光谱分析 参考董茗洋等^[12]的方法,准确称取少量样品(约 3.00 g)放入干燥箱中,45 ℃ 下干燥 8 h。然后准确称取 2.00 mg 干燥好的黑豆粉末,用压片机将样品压片,压力保持 15 kPa。测试范围为 4000~500 cm^{-1} ,扫描累加 32 次,分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.2.3 X-射线衍射分析 参考 Yang 等^[13]研究方法稍加修改,准确称取烘干后黑豆粉末 2.00 mg,利用 X-射线衍射仪测定黑豆样品的结晶特性,靶型: Cu,检测波长 15 nm,扫描范围 5°~50°,扫描速度 10°/min。采用 Origin 对光谱进行基线校正,并使用 Origin 对峰进行分配和整合。采用 MDI Jade 9.0 软件对样品的结晶度进行分析。相对结晶度的计算方法如下:

$$X_c(\%) = \frac{A_c}{(A_c + A_n)} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, A_c 和 A_n 分别表示结晶区域和无定型区域, X_c 为相对结晶度。

1.2.4 微观结构的观察 参考白婷等^[14]的方法并稍作修改,将黑豆粉末样品真空冷冻干燥,准确称取黑豆粉 2.00 mg,采用扫描电子显微镜对其进行微观结构观察,将黑豆粉样品用导电胶固定在样品盘上,放入离子溅射镀膜仪中,对样品进行喷金处理,采用放大率 500 倍到 5000 倍不等,施加电压为 10.0 kV。观察样品的微观结构。

1.2.5 热力学特性测定 参考董茗洋等^[12]的研究方法并稍作修改,准确称取黑豆粉末 3.00 mg 样品于铝锅样品皿中,加入 6.00 μL 蒸馏水,密封在铝锅中,在室温下平衡过夜。一个密封的空铝锅作为参考。测试温度从 20 ℃ 升温至 120 ℃,升温速率为 10 ℃/min。

1.2.6 吸水率和膨胀率的测定 吸水率和膨胀率测定参考张丽平等^[15]的方法, 稍作改动。称取 30 g(m_0)的黑豆颗粒样品, 料液比 1:3(g:mL), 400 W 超声, 浸泡温度 45 °C, 浸泡 8 h 后取出, 确保黑豆完整, 用厨房纸吸干表面水分, 称量其质量(m_1), 用量筒分别测定黑豆浸泡前后的样品体积 V_0 (浸泡前)和 V_1 (浸泡后), 计算黑豆的吸水率和膨胀率, 其计算公式如下:

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

$$\text{膨胀率}(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.2.7 黑豆硬度测定 参考李鹏^[16]描述方法并稍作修改, 利用质构仪(TPA)对单个黑豆进行硬度分析, 选探头为 TP10 圆柱形探头。测定参数如下: 测试前速度、测试速度、测试后速度设置为 2.0 mm/s, 压缩比 50%, 起始感应力 5 g, 两次压缩时间间隔为 5 s。每个样品重复 3 次, 求其平均值。

1.2.8 糊化度的测定 参考李鹏^[16]的研究方法并稍作修改, 称取黑豆粉末样品 0.4 g 于 50 mL 烧杯中, 向烧杯中分别加入 25 mL 的蒸馏水和 0.1 g α -淀粉酶, 将其摇晃均匀后将烧杯放入 37 °C 的恒温水浴锅中水浴加热 1.5 h。取 1 mL 1 mol/L 的盐酸溶液加入烧杯中, 将淀粉酶灭活, 将混合溶液分别移至 50 mL 容量瓶中, 滴加蒸馏水进行定容。用滤纸对混合溶液进行过滤。用加入淀粉酶液的蒸馏水作为对照。取稀释后的样品溶液 1 mL 放入试管中, 加入 2 mL 的 DNS 溶液, 在沸水浴中加热 2 min, 取出后冷水冷却至室温, 再定容至 15 mL, 摇匀后在 540 nm 的波长下测量吸光度, 每个样品测量三次取平均值。用标准葡萄糖曲线代替吸光度值, 以确定还原糖的数量。根据公式计算样品的糊化度:

$$\text{糊化度}(\%) = \frac{A - B}{C} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: α 为糊化度(%); A 为预熟化后还原糖的含量(mg); B 为预熟化前还原糖的含量(mg); C 为完全糊化后还原糖的含量(mg)。

1.2.9 体外消化测定

1.2.9.1 葡萄糖标准曲线的测定 参照赵凯等^[17]的方法稍作调整, 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 先配制 1 mg/mL 的葡萄糖标准液, 分别在 15 mL 刻度试管中加入 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 的标准液, 加入蒸馏水补足 1 mL, 使浓度分别为 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL; 加入 2 mL DNS 试剂, 沸水浴 2 min 后用冷水迅速冷却, 将溶液补足至 15 mL, 摇匀; 于 540 nm 波长下测定吸光度, 以吸光度值为横坐标(X)、葡萄糖浓度为纵坐标(Y)绘制标准曲线。

1.2.9.2 淀粉体外消化率的测定 参照 Goñi 等^[18]的方法并稍加修改, 精确称取黑豆样品 1.5 g, 将其放入 50 mL 的锥形瓶中, 加入 30 mL 0.1 mol/L 的磷酸

缓冲溶液(37 °C 预热)、1 mL 37 °C 预热的 α -淀粉酶溶液, 轻轻摇晃均匀, 用玻璃棒搅拌 15 s, 加入 6 mL 胃蛋白酶-瓜尔胶溶液, 用 4 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液冲洗干净, 用 2 mol/L HCl 溶液调到 pH1.5, 放入转子, 然后设置 37 °C 进行磁力搅拌, 转速 320 r/min, 保温 30 min。将 10 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液加入上述溶液中, 利用 50% NaOH 溶液调节 pH6.9; 加入 200 μ L MgCl_2 - CaCl_2 溶液、125 μ L 胰酶溶液、400 μ L 淀粉转葡萄糖苷酶, 补充蒸馏水至 50 mL, 在 37 °C 摇床中保温 180 min(200 r/min); 在不同时间(0、10、20、30、45、60、90 和 120 min)取 1 mL 样品放入含有 4 mL 无水乙醇溶液中(预热至 60 °C), 沸水浴灭酶后自然冷却, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液。DNS 溶液测定还原糖的方法。参照 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》测定总淀粉含量计算淀粉的水解率。

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{\text{取样时间点还原糖释放量} \times 0.9}{\text{总干物质质量}} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

1.3 数据处理

所有样品均重复测试 3 次, 取其平均值。数据采用 SPSS26 软件进行统计分析, 显著性 $P < 0.05$, 采用 Origin2020 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆分子结构的影响

图 1 展示了超声辅助 NaCl 浸泡对黑豆红外光谱的影响规律。由图 1 可知, 在 3650~3200 cm^{-1} 处为淀粉的 O-H 伸缩振动峰, 2918~1449 cm^{-1} 处为葡萄糖单元 C_6 上 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动。1450~1300 cm^{-1} 归属于 C-O 的伸缩振动。1660 cm^{-1} 附近归属于水的弯曲振动, 可能由于超声的空化作用、机械作用和热效应共同作用下, 黑豆表皮形成微孔通道^[19], 水分子进入细胞与淀粉中的羟基结合^[20]。1646~1664 cm^{-1} 代表 α -螺旋结构, 1615~1637 和 1682~1700 cm^{-1} 代表 β -折叠结构, 1664~1681 cm^{-1} 代表 β -转角结构, 1637~1645 cm^{-1} 代表无规卷曲结构^[21]。表 1 展示了不同 NaCl 浸泡对黑豆蛋白二级结构变

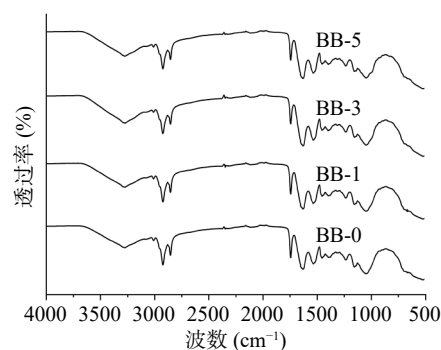


图 1 不同 NaCl 浓度浸泡对黑豆红外光谱的影响

Fig.1 Effects of soaking in different NaCl concentrations on the infrared spectra of black beans

表 1 不同 NaCl 浸泡黑豆蛋白二级结构变化情况

Table 1 Secondary structure changes of black bean protein soaked in different NaCl solution

样品号	β -折叠(%)	α -螺旋(%)	β -转角(%)	无规卷曲(%)
BB-0	37.29±0.57 ^a	35.78±0.32 ^a	19.36±0.15 ^a	7.54±0.25 ^a
BB-1	37.38±0.35 ^a	35.35±0.24 ^a	20.12±0.13 ^a	7.50±0.36 ^a
BB-3	41.12±0.25 ^b	31.63±0.32 ^b	20.92±0.24 ^a	7.31±0.13 ^a
BB-5	41.13±0.55 ^b	31.45±0.52 ^b	21.22±0.28 ^a	6.18±0.29 ^a

注: 不同字母表示组间数据差异显著($P<0.05$)。

化规律,由表 1 可以看出, β -折叠和 β -转角含量逐渐增加, α -螺旋和无规卷曲含量逐渐减少,可能是 NaCl 浸泡使黑豆中蛋白质结构发生了变化,蛋白质分子的伸展破坏了它的螺旋结构,阻止了多肽链的反转,从而使 α -螺旋转化为伸展的 β -转角结构。尚加英^[22] 证明了 NaCl 的加入使 α -螺旋结构向 β -转角结构转变。本研究发现黑豆红外光谱无新吸收峰出现,说明 NaCl 与黑豆未发生化学反应,未产生新的官能团和化学键。

2.2 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆晶体结构的影响

图 2 展示了 NaCl 浸泡对黑豆结晶特性的影响。由图 2 可知,黑豆原淀粉的结晶度为 15.10%, BB-1、BB-3、BB-5 的结晶度分别为 7.23%、9.65%、10.32%。研究结果表明,热处理引起黑豆淀粉结晶度降低,黑豆淀粉有序结构受到破坏,无定型区域增加^[23]。随着 NaCl 浓度增加,黑豆淀粉的结晶度呈升高的趋势,在超声的空化作用、热效应和机械作用联合作用下,加速钠离子向黑豆内部扩散,增加了钠离子与淀粉颗粒之间形成盐键的机会^[24],抑制了淀粉结晶区域的破坏。可能是由于蒸煮过程中黑豆淀粉与脂形成淀粉-脂复合物和淀粉-钠盐键共同作用的结果,从而使得淀粉结晶度降低结构受到抑制^[25]。

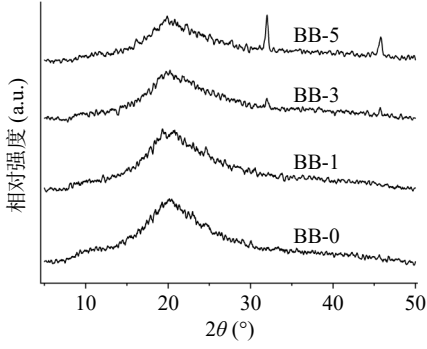
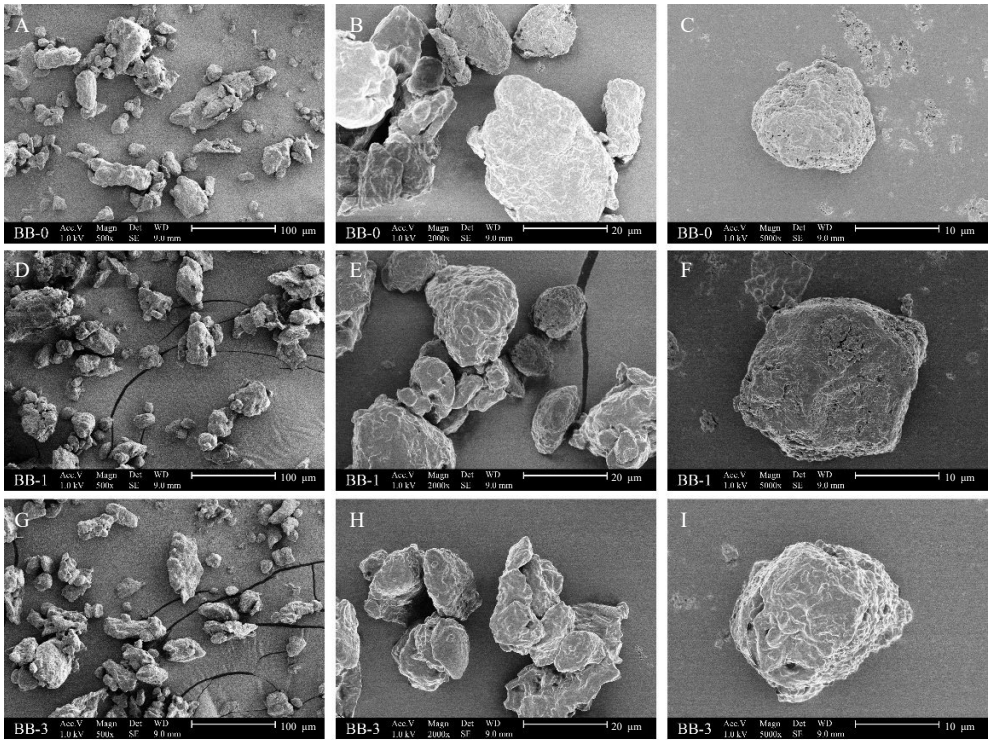


图 2 不同 NaCl 浓度浸泡对黑豆结晶结构的影响

Fig.2 Effects of different NaCl concentration on the crystal structure of black beans

2.3 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆微观结构的影响

超声辅助 NaCl 浸泡对黑豆微观结构影响显著。由图 3A 可知,黑豆颗粒间隙致密,粘连成团,呈现出团状结构。随着 NaCl 浓度的增加,图 3D、图 3G、图 3J 颗粒致密度降低,颗粒之间间隙变大,说明 NaCl 浸泡有助于黑豆颗粒的分散,可能是由于 NaCl 浸泡使果胶物质溶解,导致细胞颗粒凝聚力减弱^[26]。随着 NaCl 浓度增高,黑豆颗粒表面变得更粗糙,可能是因为在超声作用下,淀粉颗粒表面受到超声的空化效应和机械效应的结果^[13]。在较高 NaCl



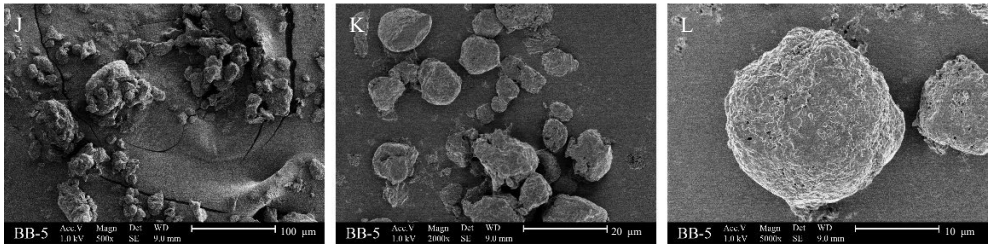


图 3 不同 NaCl 浓度浸泡对黑豆微观结构的影响

Fig.3 Effects of different NaCl concentration on the microstructure of black beans

注: 从左至右扫描电镜倍数为 500、2000、5000。

浓度下, 黑豆颗粒表面粗糙, NaCl 作为膨胀抑制剂, 黑豆淀粉吸水率降低, 淀粉吸水胀大受到抑制^[27]。

2.4 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆热特性的影响

由表 2 可知, 蒸煮后的黑豆粉在 70~90 ℃ 之间没有淀粉的糊化峰, 说明蒸煮后的黑豆淀粉已经完全糊化。在 100~120 ℃ 之间有明显的吸收峰, 可能是蛋白质变性^[28] 和淀粉-脂质复合物的特征峰^[29]。随着 NaCl 浓度升高, 焓值呈升高到分别为 0.14、1.08、1.12 J/g, 可能是钠离子与细胞壁果胶形成复合物, 加强细胞壁果胶的紧密性^[30], 淀粉糊化需要更高的能量。淀粉双螺旋解旋需要更高的能量, 熟化过程使得蛋白质分子之间相互作用降低, 蛋白质结构发生改变, 部分疏水基团外展, 较低热量即可使淀粉分子解旋。黑豆经过热处理, 更容易熟化。

表 2 不同 NaCl 浓度浸泡对黑豆热力学性质的影响

Table 2 Effects of different NaCl concentration on the thermodynamic properties of black beans

组别	起始糊化温度 (℃)	峰值糊化温度 (℃)	最终糊化温度 (℃)	$\Delta H(J \cdot g^{-1})$
BB-0	91.21	92.59	95.62	0.07
BB-1	96.54	100.74	105.00	0.14
BB-3	97.09	100.52	107.39	1.08
BB-5	106.84	107.63	115.48	1.12

2.5 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆吸水率和膨胀率的影响

图 4 展示了超声辅助 NaCl 浸泡对淀粉吸水率和膨胀率的影响。随着 NaCl 浓度的升高, 黑豆粉的

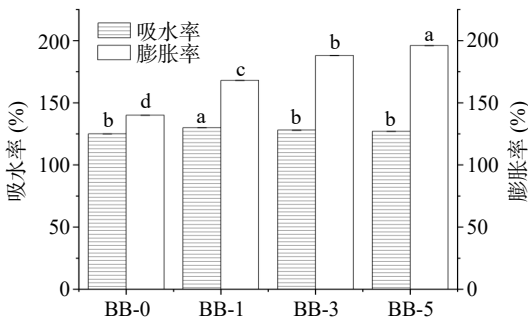


图 4 不同 NaCl 浓度浸泡对淀粉吸水率和膨胀率的影响

Fig.4 Effects of different NaCl concentration on water absorption and expansion rate of starch

注: 不同小写字母表示, 相同指标不同样品的数据差异显著 ($P<0.05$); 图 5~图 6 同。

膨胀率呈升高趋势, 比清水浸泡分别升高了 28%、48% 和 56%。说明超声诱导在黑豆表皮形成多个微孔, 超声过程加速了水分向黑豆内部的扩散作用^[31], 加速了黑豆淀粉吸水膨胀。高浓度 NaCl 溶液, 黑豆粉吸水率变化不显著。可能是高浓度的 NaCl 颗粒会附着在黑豆表皮, 阻碍水分的扩散, 从而使吸水速度变慢。刘阳等^[32] 研究碳酸氢钠浸泡会阻碍水分的扩散, 抑制绿豆吸水速度。

2.6 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆硬度的影响

图 5 为超声辅助 NaCl 浸泡对黑豆硬度的影响。由图 5 可知, 随着 NaCl 浸泡浓度的增加, 黑豆硬度呈现降低趋势, 盐溶液的浸泡对黑豆细胞组织起到了软化作用, 浸泡过程中 NaCl 溶液中钠离子可能使黑豆中原有交联果胶的二价矿物质溶出, 黑豆硬度降低^[33]。超声诱导黑豆表皮形成微孔通道, 加速 NaCl 分子向黑豆内部渗透, 黑豆颗粒吸水膨胀, 蛋白质空间结构发生变化引起黑豆硬度降低^[26]。NaCl 浸泡后的黑豆, 蛋白质结构受到破坏^[34]。

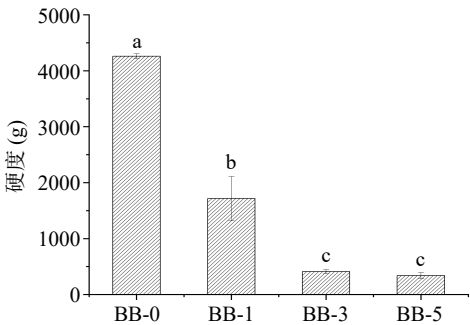


图 5 不同 NaCl 浓度浸泡对黑豆硬度的影响

Fig.5 Effects of different NaCl concentration on the hardness of black beans

2.7 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆糊化度的影响

图 6 为超声辅助 NaCl 浸泡对黑豆糊化度的影响。由图 6 可知, 随着 NaCl 浸泡浓度的增加, 黑豆糊化度呈现上升趋势。淀粉的糊化需要经历受热膨胀、双螺旋解旋、溶胀吸水等过程^[35]。清水浸泡后的黑豆糊化度为 38%, 在 1%、3% 和 5% 的 NaCl 浸泡条件下, 黑豆粉糊化度分别为 40%、43%、45%。可能是由于 NaCl 溶液使黑豆中果胶等物质溶出, 加速黑豆软化, 蒸煮后黑豆更容易糊化。在超声空化效应

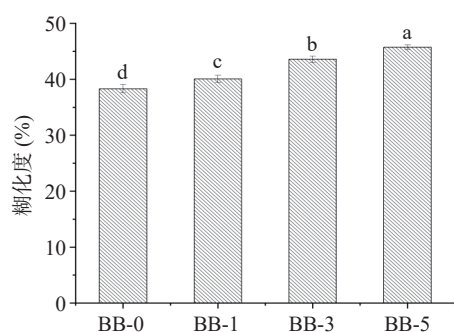


图6 不同NaCl浓度浸泡对黑豆糊化度的影响

Fig.6 Effects of different NaCl concentration on the gelatinization degree of black beans

等作用下,黑豆表皮形成微孔通道,有利于黑豆淀粉与水分子的结合,淀粉充分吸水膨胀^[36],有利于黑豆糊化现象发生。

2.8 超声辅助NaCl浸泡对熟化黑豆体外消化率的影响

图7为不同NaCl浓度浸泡对黑豆消化特性的影响。由图7可知,经120 min体外消化,清水浸泡的黑豆淀粉消化率为25.95%,经超声辅助浸泡后的黑豆, BB-1、BB-2、BB-3中黑豆淀粉消化率分别下降到19.05%、17.93%和17.48%。随着NaCl浓度的升高,黑豆淀粉消化率呈逐渐降低趋势, α -淀粉酶在弱酸条件下带正电荷,钠离子吸附在黑豆淀粉表面,阻碍了黑豆淀粉和 α -淀粉酶接触,这与Zhi等^[11]的研究结果一致。在钠离子存在的情况下,淀粉表面正电荷的增加会增加黑豆粉与淀粉酶的静电排斥作用,这些静电相互作用改变了淀粉酶活性部位构象,降低了淀粉酶与底物结合的能力,从而导致淀粉消化速率降低^[37]。

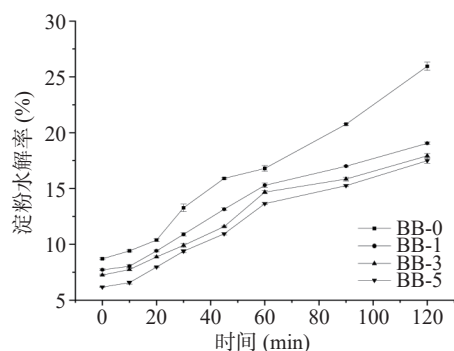


图7 不同NaCl浓度浸泡对黑豆消化特性的影响

Fig.7 Effects of different NaCl concentrations on the digestion characteristics of black beans

3 结论

通过对超声辅助NaCl浸泡黑豆的结构和消化特性的研究发现,超声和NaCl均可改善黑豆的浸泡效果。随着NaCl浓度升高,黑豆焐值呈上升趋势,形成了淀粉-脂质复合物;NaCl浸泡能够抑制黑豆淀粉结晶区域受到破坏,改善了黑豆淀粉的结晶特性;随着NaCl浓度升高颗粒致密度降低,颗粒间隙变大,黑豆粉颗粒表面变得更加粗糙;黑豆吸水率和膨

胀率升高,黑豆硬度呈下降趋势,随着NaCl浓度增加,糊化度升高。淀粉体外消化率表明,NaCl对淀粉消化特性有抑制作用。本实验结果表明,黑豆硬度、糊化度和消化特性与NaCl浓度密切相关,通过本研究可为黑豆低升糖食品的综合利用提供理论基础。

参考文献

- [1] 李和平,申晓琳,刘迎焘,等.麻辣黑豆即食产品研制及工艺优化[J].中国调味品,2017,42(9):88-92. [LI Heping, SHEN Xiaolin, LIU Yingxi, et al. Development and process optimization of spicy black bean ready-to-eat products[J]. Chinese Condiments, 2017, 42 (9): 88-92.]
- [2] TAMAM B, PURYANA I, SURATIAH, et al. Nutritional aspects and amino acid profiles of tempe from local, imported, and black soybean relating to the functional properties[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1177(1). 012027.
- [3] ROVALINO-CÓRDOVA A M, FOGLIANO V, CAPUANO E. A closer look to cell structural barriers affecting starch digestibility in beans[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 994-1002.
- [4] WANG K, GAO Y J, ZHAO J, et al. Effects of *in vitro* digestion on protein degradation, phenolic compound release, and bioactivity of black bean tempeh[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1017765.
- [5] SUN M B, LI D, HUA M, et al. Analysis of the alleviating effect of black bean peel anthocyanins on type 2 diabetes based on gut microbiota and serum metabolome[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 102.
- [6] FURUTA S, TAKAHASHI M, TAKAHATA Y, et al. Radical-scavenging activities of soybean cultivars with black seed coats[J]. Food Science and Technology Research, 2003, 9(1): 73-75.
- [7] XUE L, BAOKUN Q, SHUANG Z, et al. Effects of ultrasonic treatment on the structural and functional properties of cactus (*Opuntia ficus-indica*) seed protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 97.
- [8] ZHANG C C, WANG J F, XIE J. Quality changes of *Larimichthys crocea* pretreated by ultrasonic-assisted immersion under cold storage at 4 °C[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106484.
- [9] SAMARAH N H, AL-QURAAN N A, AL-WRAIKAT B S. Ultrasonic treatment to enhance seed germination and vigour of wheat (*Triticum durum*) in association with γ -aminobutyric acid (GABA) shunt pathway[J]. Functional Plant Biology: FPB, 2023, 50(4): 277-293.
- [10] ZHANG M H, MA J J, LI J L, et al. Influence of NaCl on lipid oxidation and endogenous pro-oxidants/antioxidants in chicken meat[J]. Food Science of Animal Products, 2023, 1(1): 9240010.
- [11] ZHI Jinglei, LIU Xinling, XU Ying, et al. Metal ion-mediated modulation of morphology, physicochemical properties, and digestibility of type 3 resistant starch microparticle[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 316: 121027.
- [12] 董茗洋,陈革,杨庆余.不同胶体对马铃薯淀粉基材料3D打印特性的影响[J].食品科学技术学报,2022,40(1):44-52.
- [13] DONG Mingyang, CHEN Ge, YANG Qingyu. Effects of different colloids on 3D printing properties of potato starch-based materials[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40 (1): 44-52.]
- [13] YANG Q Y, LU X X, CHEN Y Z, et al. Fine structure, crys-

- talline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation[J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2019, 51: 350–358.
- [14] 白婷, 李琳, 朱明霞, 等. 物理协同酶法处理对青稞淀粉结构的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1–11[2023-12-21]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020084>. [BAI Ting, LI Lin, ZHU Mingxia, et al. Effects of physical synergistic enzymatic treatment on the structure of highland barley starch[J/OL]. *Food Industry Technology*, 1–11[2023-12-21]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020084>.]
- [15] 张丽平, 张敏, 侯格妮, 等. 高粱吸水率和膨胀率测定参数优化及应用[J]. 中国酿造, 2021, 40(8): 201–205. [ZHANG Liping, ZHANG Min, HOU Geni, et al. Optimization and application of determination parameters of water absorption and expansion rate of sorghum[J]. *China Brewing*, 2021, 40(8): 201–205.]
- [16] 李鹏. 黑豆吸水模型及预熟化过程结构变化的研究[D]. 镇江: 江南大学, 2020. [LI Peng. Study on the water absorption model of black bean and the structural change of pre-ripening process[D]. Zhenjiang: Jiangnan University, 2020.]
- [17] 赵凯, 许鹏举, 谷广烨. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究[J]. 食品科学, 2008, (8): 534–536. [ZHAO Kai, XU Pengju, GU Guangye. 3,5-Dinitrosalicylic acid colorimetric method for the determination of reducing sugar content[J]. *Food Science*, 2008, (8): 534–536.]
- [18] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427–437.
- [19] MENG G T, MA C Y. Thermal properties of *Phaseolus angularis* (red bean) globulin[J]. *Food Chemistry*, 2001, 73(4): 453–460.
- [20] ZHANG S D, LIU F, PENG H Q, et al. Preparation of novel c-6 position carboxyl corn starch by a green method and its application in flame retardance of epoxy resin[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(48): 87–96.
- [21] WANG P, LIU K X, YANG R, et al. Comparative study on the bread making quality of normoxia-and hypoxia-germinated wheat: Evolution of γ -aminobutyric acid, starch gelatinization, and gluten polymerization during steamed bread making[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(12): 3480–3490.
- [22] 尚加英. 小麦淀粉颗粒大小对挂面品质影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022. [SHANG Jiaying. Study on the effect and mechanism of wheat starch granule size on the quality of noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.]
- [23] BYLER D, BROUILLETTE J, SUSI H. Quantitative studies of protein structure by FT-IR spectral deconvolution and curve fitting[J]. *Spectroscopy*, 1986, 1(3): 29–32.
- [24] ZHANG H, WANG W B, LI L, et al. Starch-assisted synthesis and characterization of layered calcium hydroxide particles[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2018, 28: 2399–2406.
- [25] OVANDO-MARTÍNEZ M, OSORIO-DÍAZ P, WHITNEY K, et al. Effect of the cooking on physicochemical and starch digestibility properties of two varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different water regimes[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 358–365.
- [26] VARRIANO-MARSTON E, OMANA E. Effects of sodium salt solutions on the chemical composition and morphology of black beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Journal of Food Science*, 1979, 44(2): 1365–2621.
- [27] ZHANG S D, LIN Z S, JIANG G, et al. Construction of chelation structure between Ca^{2+} and starch via reactive extrusion for improving the performances of thermoplastic starch[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 159: 59–69.
- [28] DAVID S R, JUAN D D F C, JOSÉ J V M, et al. Physicochemical properties of nixtamalized black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 456–462.
- [29] SANTIAGO-RAMOS D, FIGUEROA-CÁRDENAS J D D, VÉLES-MEDINA J J, et al. Resistant starch formation in tortillas from an ecological nixtamalization process[J]. *Cereal Chemistry*, 2015, 92(2): 185–192.
- [30] MARBIE A, YING L S, INDRAWATI O. Combined effects of calcium addition and thermal processing on the texture and *in vitro* digestibility of starch and protein of black beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1368.
- [31] HAN R, LIN J Q, HOU J Y, et al. Ultrasonic treatment of corn starch to improve the freeze-thaw resistance of frozen model dough and its application in steamed buns[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2023, 12(10): 1962.
- [32] 刘阳, 李丹丹, 陶阳, 等. 超声和碳酸氢钠处理对绿豆浸泡特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 42–49. [LIU Yang, LI Dandan, TAO Yang, et al. Effects of ultrasound and sodium bicarbonate treatments on the soaking characteristics of mung bean[J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(15): 42–49.]
- [33] CHIGWEDERE C M, OLAOYE T F, KYOMUGASHO C, et al. Mechanistic insight into softening of Canadian wonder common beans (*Phaseolus vulgaris*) during cooking[J]. *Food Research International*, 2018, 106.
- [34] GARCIA-VELA L A, DEL VALLE J M, STANLEY D W. Hard-to-cook defect in black beans: The effect of soaking in various aqueous salt solutions[J]. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 1991, 24(1-2): 60–67.
- [35] 熊小青, 车瑞彬, 李利民, 等. 氯化钠对 5 种不同植物来源淀粉糊特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 50–55. [XIONG Xiaoqing, CHE Ruibin, LI Limin, et al. Effects of sodium chloride on paste properties of starches from five different plant sources[J]. *Grain and Oil*, 2020, 33(2): 50–55.]
- [36] 曹格, 陈楚瑶, 韩永斌, 等. 红豆预熟化工艺及理化性质的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 24–32. [CAO Ge, CHEN Chuyao, HAN Yongbin, et al. Study on the pre-ripening process and physicochemical properties of red bean[J]. *Cereals, Oils and Food Science and Technology*, 2023, 31(3): 24–32.]
- [37] LIAO X Y, MIAO Q Q, YANG J Y, et al. Changes in phenolic compounds and antioxidant activities of "nine steaming nine sun-drying" black soybeans before and after *in vitro* simulated gastrointestinal digestion[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 111960.