

# 超高压技术在大米保鲜中的应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.03.005

巩雪 寇雪莹 张英蕾  
李子谣 唐慕蓉 孙苏玲  
张银雪

哈尔滨商业大学

轻工学院

黑龙江 哈尔滨 150028

**摘要:** 总结和回顾超高压技术在大米保鲜应用中的研究概况和主要成果, 分析了过去研究中存在的问题, 对今后的发展提出了建议。

**关键词:** 超高压; 大米; 淀粉; 蛋白质; 食用品质

**中图分类号:** TB485.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2023)03-0031-06

**引文格式:** 巩雪, 寇雪莹, 张英蕾, 等. 大米超高压包装技术研究进展 [J]. 包装学报, 2023, 15(3): 31-36, 84.

我国是世界上大米生产和消费的第一大国, 大约 2/3 的人以大米为主食<sup>[1]</sup>。大米既能提供人体所需的糖类、蛋白质、脂肪和膳食纤维等营养成分, 又能提供人体所需的铁、硒等矿物质。随着储藏时间的延长, 大米的物理和化学特性会产生变化, 进而影响大米的品质, 出现黏稠度降低、口感变差, 甚至煮出来的米粒发黄、无光泽度、无米香的现象<sup>[2]</sup>。目前, 我国大米保鲜方式主要有普通包装、真空包装、气调包装等。普通包装对大米无防虫、防霉效果<sup>[3]</sup>; 真空包装和气调包装都有利于大米水分的保持, 但在一定程度上会增加大米脂肪酸含量和米饭硬度; 对于保鲜效果而言, 真空包装更好<sup>[4]</sup>。近些年, 超高压技术 (ultra-high pressure, UHP) 成为食品加工与保鲜领域的研究热点<sup>[5]</sup>。该技术是一种新型的非热加工技术, 不仅能杀死食品的细菌、霉菌和寄生虫等, 还能较好地保留食品的风味、色泽、营养物质, 延长食品的保质期<sup>[6-7]</sup>。故本研究以大米为例, 综述超高压技术在大米保鲜应用中的研究现状, 并对今后的发展提出展望。

## 1 超高压技术原理及特点

### 1.1 超高压技术原理

超高压技术也称为超高压杀菌技术, 是一种食品加工技术, 是指在常温或较低温度条件下, 以液体为介质, 对食品施加 100 MPa 或以上的压力, 使食品中的淀粉、蛋白质、酶等生物大分子改变活性、变性或糊化, 杀灭微生物的技术<sup>[8-10]</sup>。该技术利用勒夏特列原理和帕斯卡定律。勒夏特列原理指出, 化学平衡是动态平衡, 受温度、压力和浓度的影响; 当平衡系统发生变化时, 平衡将朝着减弱这种变化的方向移动。帕斯卡定律指出, 液体压力可以瞬时快速、均匀地向系统各个方向传递<sup>[11]</sup>。高压处理时, 平衡体系将朝着体积减小的方向移动, 大分子物质的非共价键如氢键、离子键、疏水键等会发生变化, 从而导致淀粉黏性下降、蛋白质变性、酶活力下降, 而小分子物质的共价键受到的影响不大, 因而食品的色泽、香味、口感等能被较好地保留<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 大学生创新创业训练计划基金资助项目 (202210240129)

作者简介: 巩雪 (1981-), 女, 辽宁锦州人, 哈尔滨商业大学副教授, 硕士生导师, 主要从事农产品加工技术及装备研究, E-mail: gongxue@hrbcu.edu.cn

## 1.2 超高压技术特点

超高压技术有以下5个特点<sup>[12-13]</sup>: 1) 操作安全、简单。2) 时间短、效率高。3) 节能、污染少。4) 食品本身的色泽、味道、香气等风味, 维生素、纤维素等天然营养物质, 均能较好地保留。5) 新的物性食物可以通过组织变性获得。

## 2 超高压处理对大米品质的影响

### 2.1 淀粉

淀粉是大米的主要成分(含量为62%~86%), 也是人体生命活动所需能量的主要来源<sup>[14]</sup>。超高压处理会对淀粉的颗粒形貌(如形态、粒径分布等)、微观结构等产生显著影响, 使其功能特性如糊化特性、老化特性、溶解度、透光率、流变特性等发生变化<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.1 糊化特性

淀粉糊化是指在一定温度下, 淀粉颗粒吸水膨胀、破裂而形成黏稠状胶体溶液的过程。糊化的本质是晶质与非晶质态的淀粉分子间的氢键断开, 微晶束分离, 形成一种间隙较大的立体网状结构。糊化度是指淀粉中糊化淀粉与全部淀粉的质量比。淀粉的糊化度会受到温度、压力等因素的影响<sup>[16]</sup>。有学者研究发现谷物淀粉对压力敏感, 在500 MPa以上的压力下10 min即可完全糊化<sup>[17-18]</sup>。Gao J. Q. 等<sup>[19]</sup>研究发现在600 MPa加压5 min, 大米淀粉的糊化率提高75%, 糊化度达到85%的时间减少46%, 吸热能力减少36%。李玥<sup>[20]</sup>的研究结果表明, 大米淀粉糊化度的升高主要是由淀粉颗粒的膨胀引起; 糊化初期, 淀粉颗粒吸水膨胀是直链淀粉溶出的必要条件。在超高压条件下, 直链淀粉分子会聚集, 不能形成脂肪-淀粉复合物, 从而导致淀粉颗粒吸水膨胀, 糊化度提高<sup>[21]</sup>。

#### 2.1.2 老化特性

淀粉老化与糊化后淀粉分子结构的排列密切相关。淀粉老化表现出透明度下降、变硬, 形成凝胶或析水率降低<sup>[22]</sup>。淀粉老化过程包括淀粉分子在水中的转移、水分的重新分配和再结晶<sup>[23]</sup>。大米的感官品质、口感以及保质期等都会受到淀粉老化的影响<sup>[19]</sup>。高嘉琦<sup>[24]</sup>研究发现超高压处理大米时, 糊化度达到85%所需的时间缩短, 且糊化过程中吸收热量也明显减少, 其糊化速率会随着压力的增大而明显加快。侯磊等<sup>[25]</sup>的研究结果表明, 超高压处理经过质量分

数为0.8%的柠檬酸溶液浸泡的大米时, 随着压力的增加, 淀粉糊化度逐渐增高, 大米老化度显著降低。

#### 2.1.3 淀粉结构及消化性

淀粉主要分为直链淀粉和支链淀粉两大类, 两者在大米中的比例是影响大米蒸煮条件和食味品质的主要因素<sup>[26]</sup>。朱秀梅<sup>[27]</sup>的研究表明, 直链淀粉的含量随着压力的增加而增加, 直链淀粉的含量在140 MPa下达到最高; 超高压作用下, 支链淀粉会被降解, 含量降低。淀粉颗粒的形状和结晶结构、直链-支链淀粉的比率等都是影响淀粉消化率的内在因素<sup>[28]</sup>。王硕等<sup>[29]</sup>研究发现, 超高压会破坏淀粉结构, 进而影响淀粉的消化性; 淀粉的消化率会随着压力的升高而升高。此外, 有研究表明超高压处理有助于降低食品加工后淀粉葡萄糖的释放量。

综上所述, 超高压处理会对大米的淀粉结构产生影响, 提高大米的糊化度和析水率, 降低大米的老化速率, 同时还能提高大米的感官品质和食用品质, 使大米的营养成分可以最大程度地被保留下来, 延长其保质期。

### 2.2 蛋白质

蛋白质是大米的第二大成分(含量为6%~9%), 是人类膳食中蛋白质的主要来源<sup>[17]</sup>。用Osborne法分级提取的4类大米蛋白质为水溶性清蛋白、盐溶性蛋白、醇溶性蛋白、稀酸或稀碱溶性谷蛋白<sup>[30-31]</sup>。

#### 2.2.1 蛋白质结构

蛋白质结构可分为一、二、三和四级结构, 其中二级结构取决于多肽链内和多肽链之间的氢键, 有稳定 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -转角、 $\beta$ -折叠和不规则卷曲等结构<sup>[32-33]</sup>。超高压处理不会影响蛋白质的一级结构, 但是会对二、三、四级结构产生影响。压力会引起蛋白质的局部或整体变化, 最终达到蛋白质变性的目的<sup>[34]</sup>。杨柳怡<sup>[35]</sup>研究了100~500 MPa压力对大米蛋白结构的影响。研究结果表明, 随着压力的增加, 大米蛋白二级结构中 $\alpha$ -螺旋和无规则卷曲含量逐渐降低,  $\beta$ -折叠含量升高, 而 $\beta$ -转角含量则是先升高后降低; 随着压力的增加, 大米蛋白质中游离巯基含量和表面疏水性呈先上升后下降的趋势, 300 MPa时最高。张晶<sup>[36]</sup>研究发现高压均质处理会影响大米蛋白质的三级结构, 但不会影响大米蛋白质的亚基结构。张栋昊等<sup>[30]</sup>研究发现, 超高压技术可以改变大米中蛋白质的二级结构( $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和不规则卷曲结构), 影响蛋白质与淀粉分子间的相互作用,

进而改善米饭的质构特征。此外,超高压技术还能促进蛋白质、氨基酸的降解,激活大米中内源酶活性,促使米饭中香气和滋味化合物的生成,提高米饭的食用品质。

### 2.2.2 蛋白质溶解性

蛋白质溶解性是指蛋白质分散于水中的数量,取决于分子之间的排斥力和吸引力的平衡<sup>[37]</sup>。蛋白质原料作为食品的先决条件之一是蛋白质水化作用。蛋白质溶解性是蛋白质水化作用的一个重要表现,直接影响食品中蛋白质的稳定性及其风味等<sup>[38]</sup>。管弋钊等<sup>[39]</sup>研究发现,用不同压力(200~600 MPa)对大米进行超高压处理时,随着压力的升高,蛋白质溶解性呈现先升高后降低的趋势;超高压处理会使蛋白质分子结构松散,将蛋白质有序结构转化为无序结构,降低蛋白质有序结构含量,进而提高蛋白质溶解性。王章存等<sup>[40]</sup>研究了在 pH 值为 8 的不同溶剂下(氢氧化钠溶液,以浓度为 6 mol/L 的尿素和体积分数为 1% 的  $\beta$ - 巯基乙醇配置的水溶液),高压处理对大米蛋白质溶解性的影响。结果表明,当处理压力增加时,蛋白质溶解性得到了明显的改善;在 100 MPa 压力、保压 20 min 下,蛋白质溶解度最高。

另外,研究发现大米的蛋白质含量与食味品质呈显著的负相关。随着蛋白质含量的增加,大米的硬度增加,弹性降低,大米的色泽和食味品质变差<sup>[41]</sup>。蛋白质含量直接影响到熟制米饭的吸水率。蛋白质含量低、黏度高、质地较硬的大米能烹制成松软的米饭<sup>[42]</sup>。

综上所述,超高压下大米的蛋白质结构会发生变化,蛋白质溶解性增加,从而增强大米的香味,改善大米的品质和口感。

### 2.3 其他营养成分

除了淀粉和蛋白质外,大米还有含量约为 0.6%~3.9% 的脂类、丰富的 B 族维生素和矿物元素等<sup>[17]</sup>。大米中的脂类主要是不饱和脂肪酸,易于水解和氧化。脂类氧化会使脂肪酸含量增加、淀粉强度增大,进而导致米饭口感变差。因此,脂肪酸含量常用作评价大米品质的重要指标<sup>[43]</sup>。励建荣等<sup>[44]</sup>研究发现,在脂类的状态变化中,压力与主临界温度呈线性关系,超高压对脂类的影响是可逆的。M. N. Marie-Olive 等<sup>[45]</sup>的研究结果表明,在 50~350 MPa 的高压下,残余酶的活性增加能更好地保护脂肪酶。另外,酶的活性部分是以非共价键为主,对压力更为敏感。在超高压条件下,这种压力主要作用于非共价键,因而酶的活性

中心结构会发生改变,影响酶的催化活性<sup>[46]</sup>。这说明超高压下脂肪酶的活性增强,可以更高效地水解脂肪酸,降低脂肪酸含量。赵卿宇等<sup>[47]</sup>研究发现,大米中脂肪酸的含量越低,大米的品质越好。

大米中的维生素和矿物质也是人体所需的重要营养物质<sup>[48]</sup>。詹耀<sup>[49]</sup>研究了超高压处理对糙米物性品质的影响,检测了在 200, 400, 500 MPa 压力下糙米的维生素 B1、钙和铁的含量。结果表明:超高压处理对维生素 B1 的影响不大;虽然超高压处理会降低钙和铁的含量,但是在钙和铁的保留率方面超高压处理对糙米仍有显著的优越性。可见,超高压处理可以较好地保留食品中的钙、铁,最大限度保留食品的营养价值。

## 3 展望

超高压技术能较好保留食品本身的色泽、风味等食用品质,因而在食品领域的应用前景广阔。目前,国内外对超高压处理大米的保鲜包装技术研究相对较少,主要研究的是大米淀粉和蛋白质的结构变化对食品品质的影响。与发达国家相比,我国超高压技术的发展和运用仍处于早期阶段,大多数研究还处于理论实验阶段<sup>[50]</sup>。我国超高压技术存在很多亟待解决的问题,比如生产成本低,产能低<sup>[51]</sup>,缺乏相关标准来规范超高压生产工艺<sup>[52]</sup>,等等。未来,超高压处理大米的研究可从以下几个方面展开:经超高压处理的大米对人体消化特性的影响,如是否对糖尿病人友好,减少人体对糖分的吸收等;优化超高压设备,使其轻量化和小型化,提高生产效率;制定相关标准,以规范超高压生产工艺。

### 参考文献:

- [1] 郑红明. 2021 年中国稻谷(大米)产业报告 [N]. 粮油市场报, 2021-11-16(T10).  
ZHENG Hongming. 2021 China Paddy (Rice) Industry Report [N]. Grain and Oil Market Report, 2021-11-16(T10).
- [2] 陆益钡, 樊炯, 马莉娜, 等. 不同包装方式对大米品质特性的影响 [J]. 农产品加工, 2022(11): 21-25.  
LU Yibei, FAN Jiong, MA Lina, et al. Study on Quality Characteristics of Rice by Different Packing Methods [J]. Farm Products Processing, 2022(11): 21-25.



- [3] 周显青, 伦利芳, 张玉荣, 等. 大米储藏与包装的技术研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2013, 21(2): 71-75.  
ZHOU Xianqing, LUN Lifang, ZHANG Yurong, et al. Research Progress on Rice Storage and Packing Technology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21(2): 71-75.
- [4] 迟吉捷. 大米包装保鲜技术研究进展 [J]. 园艺与种苗, 2021, 41(5): 70-73.  
CHI Jijie. Research Progress on Rice Fresh-Keeping Package Technique[J]. Horticulture & Seed, 2021, 41(5): 70-73.
- [5] 程凯丽, 胡志和, 赵旭飞, 等. 超高压处理对乳制品中蛋白质和酶的影响研究进展 [J]. 乳业科学与技术, 2019, 42(6): 34-40.  
CHENG Kaili, HU Zhihe, ZHAO Xufei, et al. A Review of the Effect of High Hydrostatic Pressure on Proteins and Enzymes in Dairy Products[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2019, 42(6): 34-40.
- [6] 任博文, 董璇, 何珊. 超高压技术在食品应用中的研究进展 [J]. 农产品加工, 2022(16): 61-63, 67.  
REN Bowen, DONG Xuan, HE Shan. Research Progress on Application of Ultra-High Pressure Technology in Food[J]. Farm Products Processing, 2022(16): 61-63, 67.
- [7] 丑述睿. 不同 pH 及超高压条件对大米 / 玉米淀粉 - 苹果多酚体系理化性质的影响机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
CHOU Shurui. Effect of pH and High Hydrostatic Pressure Processing on Physicochemical Properties and Mechanism of Rice/Maize Starch-Apple Polyphenol[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [8] 戴浩然, 冯雅, 何诗行. 食品超高压技术应用及装备研究进展 [J]. 食品工业, 2022, 43(9): 179-182.  
DAI Haoran, FENG Ya, HE Shihang. Research Progress of Food High Pressure Technology and Equipment[J]. The Food Industry, 2022, 43(9): 179-182.
- [9] BAUER B A, HARTMANN M, SOMMER K, et al. Optical in Situ Analysis of Starch Granules Under High Pressure with a High Pressure Cell[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2004, 5(3): 293-298.
- [10] 杜宗绪. 食品超高压处理技术及其应用 [J]. 河北农业科学, 2008, 12(12): 56-57, 60.  
DU Zongxu. Application of Ultra High Pressure Processing Technology in Food Industry[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(12): 56-57, 60.
- [11] 刘文聪. 超高压技术在食品加工中的应用 [J]. 福建轻纺, 2010(5): 28-32.  
LIU Wencong. Application of Ultra-High Pressure Technology in Food Processing[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2010(5): 28-32.
- [12] 牛淑萍, 艾麦提·巴热提. 超高压技术在蛋白质食品加工中的应用分析 [J]. 现代食品, 2021(20): 125-127.  
NIU Shuping, Aimaiti·Bareti. Application Analysis of Ultra-High Pressure Technology in Protein Food Processing[J]. Modern Food, 2021(20): 125-127.
- [13] 刘树攀. 超高压技术在食品加工中的应用 [J]. 食品安全导刊, 2022(14): 163-165.  
LIU Shupan. Application of Ultra-High Pressure Technology in Food Processing[J]. China Food Safety Magazine, 2022(14): 163-165.
- [14] 朱世民. 预处理对大米中淀粉颗粒分离及米粉理化性质的影响 [D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.  
ZHU Shimin. Effect of Pretreatment on Separation of Starch Particles in Rice and Physical and Chemical Properties of Rice Flour[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2022.
- [15] 张晶, 张美莉. 超高压处理对谷物淀粉影响的研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 172-179.  
ZHANG Jing, ZHANG Meili. Research Progress on the Effect of High Hydrostatic Pressure Treatment on Cereal Starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(7): 172-179.
- [16] 黄立兰, 黄广明, 劳晔. 淀粉糊化度测定方法的研究进展 [J]. 饲料工业, 2014, 35(13): 53-57.  
HUANG Lilan, HUANG Guangming, LAO Ye. Research Progress of the Methods of Determining the Degree of Starch Gelatinization[J]. Feed Industry, 2014, 35(13): 53-57.
- [17] OH H E, PINDER D N, HEMAR Y, et al. Effect of High-Pressure Treatment on Various Starch-in-Water Suspensions[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(1): 150-155.
- [18] BUCKOW R, HEINZ V, KNORR D. High Pressure Phase Transition Kinetics of Maize Starch[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 469-475.
- [19] GAO J Q, YANG H X, RONG A, et al. Effects of HHP on Microorganisms, Enzyme Inactivation and Physicochemical Properties of Instant Oats and Rice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(2): 191-198.

- [20] 李 玥. 大米淀粉的制备方法及其物理化学特性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.  
LI Yue. Studies on Isolation Process and Physicochemical Properties of Rice Starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [21] KIM H S, CHOI H S, KIM B Y, et al. Characterization of Acetylated Corn Starch Prepared Under Ultrahigh Pressure (UHP)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(6): 3573-3579.
- [22] 张 晶. 超高压处理对燕麦淀粉  $\beta$ -葡聚糖复配体系的影响及抑制淀粉老化机制的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.  
ZHANG Jing. Study on the Effects of Ultra-High Pressure Treatment on Oat Starch/ $\beta$ -Glucan Compound System and Mechanism of Inhibiting Retrogradation of Starch[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [23] JIANG B, LI W H, SHEN Q, et al. Effects of High Hydrostatic Pressure on Rheological Properties of Rice Starch[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(6): 1334-1344.
- [24] 高嘉琦. 超高压处理对燕麦方便米饭原料特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.  
GAO Jiaqi. The Effect of Ultra-High Pressure (UHP) Treatment on Material Characteristics of Oat Convenient Rice[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012.
- [25] 侯 磊, 沈 群. 浸泡和超高压预处理对大米品质的影响 [J]. 粮油食品科技, 2012, 20(2): 1-4.  
HOU Lei, SHEN Qun. Impact of Soaking and Ultrahigh-Pressure Pretreatment on Rice Quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2012, 20(2): 1-4.
- [26] 王翠玲, 戴常军, 王 晶, 等. 不同酶处理对多孔大米淀粉性能的影响 [J]. 中国食品学报, 2023: 1-10.  
WANG Cuiling, DAI Changjun, WANG Jing, et al. Effect of Different Enzyme Treatments on the Properties of Porous Rice Starch [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023: 1-10.
- [27] 朱秀梅. 大米直链淀粉在动态超高压微射流均质中的机械力化学效应研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2010.  
ZHU Xiumei. The Mechanochemical Effect of the High Pressure Microfluidization to Rice Amylose[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [28] 赵 凯, 谷广烨. 淀粉消化性分析研究进展 [J]. 食品科学, 2007, 28(9): 586-590.  
ZHAO Kai, GU Guangye. Research Advances in Starch Digestibility Analysis[J]. Food Science, 2007, 28(9): 586-590.
- [29] 王 硕, 黄 薇, 王金荣, 等. 食品非热加工技术: 超高压在蛋白质和淀粉改性中的应用 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 1-13.  
WANG Shuo, HUANG Wei, WANG Jinrong, et al. Non-Thermal Processing Technologies of Food: The Application of Ultrahigh Pressure in Protein and Starch Modification[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6): 1-13.
- [30] 张栋昊, 蔡妍培, 劳 菲, 等. 大米蛋白质与米饭食味品质关联性研究进展 [J]. 食品科学, 2022: 1-13.  
ZHANG Donghao, CAI Yanpei, LAO Fei, et al. Research Progress on the Relation Between Rice Protein and Eating Quality[J]. Food Science, 2022: 1-13.
- [31] 苏 茜. 超高压处理对小米蛋白质功能特性的影响 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2020.  
SU Xi. Effect of Ultra-High Pressure Treatment on Functional Characteristics of Millet Protein[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [32] TANAKA K, SUGIMOTO T, OGAWA M, et al. Isolation and Characterization of Two Types of Protein Bodies in the Rice Endosperm[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1980, 44(7): 1633-1639.
- [33] 巩 雪, 常 江, 李丹婷. 扇贝超高压脱壳工艺参数优化研究 [J]. 包装学报, 2019, 11(3): 68-75.  
GONG Xue, CHANG Jiang, LI Danting. Technological Parameter Optimization of Scallop Shelling Under Ultra High Pressure[J]. Packaging Journal, 2019, 11(3): 68-75.
- [34] 陈梦婷, 郑昌亮, 汪 兰, 等. 超高压技术在蛋白质改性和活性肽制备中的应用研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(5): 298-304.  
CHEN Mengting, ZHENG Changliang, WANG Lan, et al. Progress in the Application of Ultra-High Pressure Technology in Protein Modification and Bioactive Peptide Preparation[J]. Food Science, 2023, 44(5): 298-304.
- [35] 杨柳怡. 大米蛋白的酶解-超高压改性及其乳液稳定性研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.  
YANG Liuyi. Enzymatic Hydrolysis-High Hydrostatic Pressure Modification of Rice Protein and Its Emulsion Stability[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [36] 张 晶. 均质及酶解对大米蛋白功能特性的影响及机理的初探 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.  
ZHANG Jing. The Effects of Homogenization and

- Enzymatic Hydrolysis on the Functional Properties of Rice Protein and Preliminary Study on Its Mechanism[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [37] 李明月, 杜钰, 姚晓玲, 等. 超高压处理对蛋白质功能特性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 50-54.  
LI Mingyue, DU Yu, YAO Xiaoling, et al. Effects of Ultrahigh Pressure Processing on Protein Functional Properties[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(1): 50-54.
- [38] 周一鸣, 刘倩, 周小理, 等. 超高压对食品蛋白质结构性质影响的研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 285-288.  
ZHOU Yiming, LIU Qian, ZHOU Xiaoli, et al. A Review on Effect of Ultrahigh Pressure on Structure and Properties of Food Protein[J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 285-288.
- [39] 管弋钰, 何苗, 熊双丽. 超高压处理对大米蛋白功能特性及结构的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(20): 104-109.  
GUAN Yixian, HE Miao, XIONG Shuangli. Effects of Ultra High Pressure Treatment on Functional Properties and Structure of Rice Proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 104-109.
- [40] 王章存, 田卫环, 崔胜文, 等. 高压处理对大米蛋白溶解性及分子结构特征的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(4): 609-615.  
WANG Zhangcun, TIAN Weihuan, CUI Shengwen, et al. Effects of High Hydrostatic Pressure on the Solubility and Molecular Structure of Rice Protein[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(4): 609-615.
- [41] 殷坤, 刘金明, 张东杰, 等. 基于近红外光谱的大米蛋白质含量快速检测[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 82-88, 175.  
YIN Kun, LIU Jinming, ZHANG Dongjie, et al. Rapid Detection of Protein Content in Rice Based on Near Infrared Spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 82-88, 175.
- [42] 孙威. 储藏时间对大米蛋白质组分的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2016(4): 14-18.  
SUN Wei. Effect of Different Storage Time on Protein Composition of Rice[J]. Cereal & Feed Industry, 2016(4): 14-18.
- [43] 陈能, 谢黎虹, 段彬伍. 稻米中含二硫键蛋白对其米饭质地的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 167-170.  
CHEN Neng, XIE Lihong, DUAN Binwu. Effect of Disulfide Bond-Containing Protein on Texture of Cooked Rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(1): 167-170.
- [44] 励建荣, 夏道宗. 超高压技术在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2002, 23(7): 79-81.  
LI Jianrong, XIA Daozong. Application of Ultra-High Pressure Technology in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(7): 79-81.
- [45] MARIE-OLIVE M N, ATBES V, COMBES D. Combined Effects of Pressure and Temperature on Enzyme Stability[J]. High Pressure Research, 2000, 19: 317-322.
- [46] LULLIEN-PELLERIN V, BALNY C. High-Pressure as a Tool to Study Some Proteins' Properties: Conformational Modification, Activity and Oligomeric Dissociation[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2002, 3(3): 209-221.
- [47] 赵卿宇, 郭辉, 陈博睿, 等. 大米储藏过程品质变化及其动力学[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 204-212.  
ZHAO Qingyu, GUO Hui, CHEN Borui, et al. Kinetics of Quality Change of Rice during Storage[J]. Food Science, 2020, 41(21): 204-212.
- [48] LARSSON K. Inhibition of Starch Gelatinization by Amylose-Lipid Complex Formation. Behinderung Der Stärkeverkleisterung Durch Bildung Eines Amylose-Lipidkomplexes[J]. Starch - Stärke, 1980, 32(4): 125-126.
- [49] 詹耀. 超高压处理对糙米物性品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
ZHAN Yao. Effect of High Pressure Treatment on the Physical Quality of Brown Rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [50] 曹妍妍, 杨傅佳, 吴靖娜, 等. 超高压技术在水产品贮藏加工应用中的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(18): 6143-6148.  
CAO Yanyan, YANG Fujia, WU Jingna, et al. Research Progress of Ultra-High Pressure Technology in Storage and Processing of Aquatic Products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(18): 6143-6148.
- [51] 于林杰. 超高压食品加工设备现状及发展趋势[J]. 食品安全导刊, 2021(31): 162-164.  
YU Linjie. Current Status and Development Trend of Ultra-High Pressure Food Processing Equipment[J]. China Food Safety Magazine, 2021(31): 162-164.

(下转第84页)