

绿豆预熟化工艺及品质研究进展

Research progress of mung bean pre-curing technology and quality

曲美霖 胡俊君 程哲 李云龙

QU Meilin HU Junjun CHENG Zhe LI Yunlong

(山西农业大学山西功能食品研究院, 山西 太原 030031)

(Institute of Functional Food of Shanxi, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

摘要: 绿豆具有丰富的营养物质, 但致密的结构和紧密的皮层等因素, 导致其熟化时间较长, 食用方便性不佳。文章着重围绕预绿豆熟化展开分析, 重点阐述绿豆的预熟化工艺以及加工方式对其食用品质和营养成分的影响, 并对绿豆预熟化工艺的发展方向进行了展望。

关键词: 绿豆; 预熟化; 工艺; 食用品质; 营养成分

Abstract: Mung beans are rich in nutrients, but their dense structure and dense cortex lead to long a maturation time and poor edible convenience. To provide an empirical basis and novel ideas for future research on the pre-ripening of mung beans, this review analyzes pre-ripening, specifically focusing on the pre-ripening process of mung beans and the effects of different processing methods on the edible quality and nutritional components of mung beans. Moreover, the development direction of preripening technology of mung beans is also prospected.

Keywords: mung bean; precuring; technology; edibility; nutritional components

绿豆作为中国主要的食用豆类之一, 兼具药食两用的性质, 含有丰富的蛋白质、膳食纤维、多种维生素、钙、磷、铁、黄酮类化合物、生物碱、豆固醇等物质, 具有解毒、降血脂、抗氧化等保健功能。绿豆既是调节饮食的佳品, 又是食品工业的重要原料, 还是防病治病之良药^[1-2]。但是由于结构致密、皮层紧密、吸水性较差以及颗粒大小等差异, 致使绿豆蒸煮耗时较长、口感粗糙, 不适应现代

社会越来越快的生活节奏, 消费者尤其是年轻一代的接受程度低^[3]。研究拟针对绿豆在预熟化工艺及品质研究方面展开梳理论, 分析各种工艺对绿豆营养及活性成分等的影响, 以期在现有的研究基础上寻找出一种适宜有效的绿豆预熟化技术, 能够在不影响绿豆完整形态的前提下, 尽可能多地保留其活性成分并实现快速熟化, 旨在为进一步提升绿豆食用品质和综合利用提供依据。

1 绿豆的预熟化工艺

张桂芳等^[4]通过对预熟化工艺进行比较全面的研究, 确定了绿豆的浸泡、蒸制和微波干燥技术加工速熟绿豆的工艺及参数, 其加工的速熟绿豆含水量低, 复水性较好且产品的感官指标均良好。张桂芳等^[5]、巩僖等^[6]创新性地浸泡和干燥阶段之间加入冷冻工艺, 可以维持淀粉糊化后的 α -型状态, 并通过迅速干燥失水使 α -型得到固定, 利用低温贮藏和降低水分的方式来延缓和阻止绿豆中淀粉的老化, 以达到缩短熟化时间的目的。乔筱童^[7]采用相对温和的低压蒸煮工艺, 对比了热风干燥、微波干燥、热风与微波联合干燥 3 种干燥方式并确定了热风与微波联合干燥的最优工艺条件, 在该工艺条件下, 绿豆的糊化度和感官评价最高, 同时实现了绿豆的预熟化, 达到能与大米共煮同熟的目的。

预熟化工艺分为浸泡、熟化和干燥 3 个序段: 浸泡使水分进入豆子内部, 有助于预熟; 熟化可以使绿豆缩短后续蒸煮时间; 干燥可以降低预熟后绿豆中的水分含量, 延长贮藏期。在浸泡方面的关注点主要集中于料水比、浸泡时间和温度等因素^[4-5]。熟化方面的加工工艺较为丰富, 主要是热处理, 具体可以分为 3 种: 湿热处理, 如蒸煮(低压蒸煮、常压蒸煮、高压蒸煮); 干热处理, 如烘焙、高温流化; 还有微波加热。干燥方式主要有热风干燥、微波干燥、热风与微波联合干燥等。其中微波可同时作为熟化和干燥的工艺环节, 如于雷等^[8]、李晓蒙^[9]均是微波作为熟化工序, 实现了绿豆的预熟化。

基金项目: 山西省基础研究计划自由探索类项目(编号: 202203021212456); 山西农业大学杂粮研究院科研项目(编号: ZL20210601); 国家现代农业(燕麦荞麦)产业体系建设专项(编号: CARS-07-E-2)

作者简介: 曲美霖, 女, 山西农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 程哲(1985—), 女, 山西农业大学副研究员, 硕士。

E-mail: chengzhe31@163.com

李云龙(1979—), 男, 山西农业大学研究员, 硕士。

E-mail: liyunlong125@126.com

收稿日期: 2023-05-25 **改回日期:** 2023-11-14

2 预熟化工艺对绿豆食用品质的影响

2.1 糊化度

预熟化工艺中与食用品质关系最为密切的就是熟化工序,其会对绿豆的糊化性、硬度、熟化时间、色泽、香味等食用品质产生不同程度的影响。例如,蒸煮处理^[10]和微波处理^[11]均会造成绿豆硬度降低、糊化度升高且硬度与糊化度之间具有较强相关性。此外,孙军涛等^[12]进一步研究了高温高压蒸煮时,温度对绿豆糊化度的影响,发现绿豆在高温高压蒸煮时,同一时间不同温度下绿豆的糊化度基本相同(53%左右),但在 125 °C 时下降至 39%;同一温度条件下,随着蒸煮时间的延长,糊化度基本呈先上升后趋于稳定的状态,与白洁等^[13]的研究结果类似。同时,孙军涛等^[12]对比了两种不同压力的蒸煮处理对绿豆熟化时间的影响,在一定的高温高压条件下处理的绿豆与常温常压处理的结果相似,其时间更短且无需浸泡。

2.2 吸水率与膨胀度

由于绿豆坚硬的质地,在食品加工中软化处理是十分重要的步骤,常见的软化方法包括浸泡、蒸煮。浸泡可以软化绿豆的质地,使其吸水膨胀,缩短蒸煮时间,同时也可以去除绿豆内的单宁、植酸等物质。但过度的浸泡会导致绿豆中营养物质流失^[14]。不同的浸泡方式(超声和微波辅助浸泡、化学法辅助浸泡和酶法辅助浸泡)以及不同的预熟化处理(常压蒸煮、高压蒸煮和微波),随着浸泡时间的延长和温度的提高,通常伴随着质量、体积的增加,同时吸水率也呈不断上升的趋势,直至饱和^[11,15]。

2.3 感官评分

预熟化工艺对绿豆感官评分的评价因素主要是色泽、外观、气味。有研究^[11,16]表明,随着处理参数的增加,绿豆的种皮颜色逐渐加深,色泽逐渐变暗,这与美拉德反应以及种皮色素的迁移有关;外观通常出现开裂的现象,严重的出现开花现象,例如常压和高压蒸汽处理^[11];在气味方面,处理参数的增加,往往伴随着浓郁的豆香味出现。

2.4 质构特性

质构特性能够间接反映绿豆的感官品质以及糊化度,直接反映了绿豆的食用品质。经不同方式处理的绿豆在质构特性方面具有相似性。经处理后的绿豆,通常硬度、黏性以及咀嚼性会下降至接近米饭的程度,远小于原料绿豆,而黏着性和弹性则大于原料绿豆^[7,9,17]。

3 预熟化工艺对绿豆成分的影响

3.1 营养成分

3.1.1 水分 绿豆经过预熟化的浸泡、熟化、干燥处理后,其水分含量变化最为明显:浸泡 18 h 后水分达到 50%^[18],熟化工序中水分标准为 7%~10%^[19],干燥至水分 $\leq 6\%$ ^[5]。王英等^[19]研究了不同微波干燥条件(微波时

间及微波火力)对绿豆中水分含量的影响,结果表明,在其他因素不变的条件下,绿豆中的水分含量随微波时间的延长和微波火力的增大而减少。但是水分在不同阶段的规律表现会对谷物造成基本成分、淀粉糊化以及后续贮藏等不同的影响。例如,在高温高压处理中,同一温度条件下,随着处理时间的延长,当温度过高,体系内的水分蒸发速率会大于水分吸收,不利于其吸水膨胀,导致淀粉糊化度下降。说明当样品体系内吸水速率下降时,糊化度会因此受到影响^[12];水分在干燥过程中会形成水分梯度,导致谷物内部形成压力,产生缝隙,这些缝隙便会成为水分进入原料内部的通道,在适当的处理中使细胞内的淀粉、蛋白质等成分更易溶出,品质得到改善^[20];此外,水分含量会影响样品贮藏期间的呼吸代谢及微生物生长,进而影响样品的硬度和食用品质,因此,经浸泡一熟化处理后的绿豆通常需要进一步干燥^[21],在干燥过程中,样品内的水分大量蒸发,降低体系内的水分含量,从而提高样品的贮藏稳定性^[22]。因此在预熟化过程中,水的存在至关重要,不仅会影响绿豆基础营养成分的析出和释放,也会影响绿豆熟化的程度和熟化后产品的贮藏。

3.1.2 蛋白质 绿豆中的蛋白质含量较高为 21%~27%,所得蛋白与动物蛋白相比具有可持续、健康的优点,并具有刺激神经系统、促进肠胃蠕动的作用^[23]。在不同的加工方式下,其内在蛋白质组分和功能性质会发生一定变化。对比干热处理和湿热处理对蛋白结构的影响发现,干热处理后绿豆蛋白的 β -折叠结构含量显著增加, α -螺旋和 β -转角结构则相反^[24];而湿热处理后蛋白二级结构中的 β -折叠含量显著降低, α -螺旋和 β -转角含量则显著增加^[25]。在绿豆功能性质方面,张舒等^[24,26]分析了焙烤、蒸制和煮制 3 种热处理对绿豆持水性、持油性、起泡性、溶解性、乳化性等性质的影响,3 种方式均会改善绿豆蛋白的功能性质,其中最优处理为焙烤,其次为蒸制和煮制。Mubarak^[27]研究表明,绿豆蛋白的氨基酸结构与大豆蛋白相当,同时脱壳、浸泡、蒸煮以及微波处理均可提高绿豆的蛋白质功效。但由于其烹饪难的特点,开发利用仍不完全,因此 Brishti 等^[28]对绿豆进行适当条件的高温挤压后,其蛋白物理性质(膨胀比、容重、复水率、吸水能力等)均得到了理想的改变,同时显微结构沿剪切流动方向排列,部分蛋白质结构展开,氨基酸保留率较高,优化后的绿豆蛋白作为肉类补充剂具有很强的发展潜力。

3.1.3 淀粉 绿豆中的总淀粉含量约为 40.6%~48.9%,其中直链淀粉占总淀粉的 12.5%~35.4%^[23]。刘紫薇等^[29]采用传统的常压煮制方法处理绿豆,研究了煮制时间和绿豆淀粉的关系,表明二者之间成反比,即随着煮制时间的延长,绿豆中的总淀粉和直/支链淀粉含量以及膨胀度均呈下降趋势,而溶解度呈上升趋势。

目前绿豆淀粉深加工方面的研究较为广泛,同时绿豆中提取出的抗性淀粉(RS)热稳定良好,不为人体提供热量,可以作为新型功能性食品的配料^[30-31]。研究发现,湿热处理^[32-35]和干热处理^[36]会对绿豆的淀粉结构产生相反的影响,在湿热处理中,淀粉的结晶度和有序性均降低,而干热处理的则相反,相同的是两种处理方式均增加了绿豆淀粉对酶消化的抵抗能力。这与两种处理方式对绿豆蛋白结构的影响有相似性。此外,也有研究^[34]表明,绿豆中抗性淀粉含量的增加与湿热处理的时间、温度及水分含量有关,同时也与湿热处理后绿豆中直链淀粉含量有关。Li等^[37]研究了超高压(UHP)糊化对绿豆重结晶过程的影响,发现超高压糊化后的淀粉颗粒经老化处理可再生为C型结晶结构,且随着老化时间的延长,颗粒的透光率逐渐降低,抗性淀粉含量逐渐增加。综上,湿热处理、微波处理和超高压处理均对绿豆抗性淀粉含量有所增加,对淀粉结构存在不同的影响,或可影响淀粉消化率,尤其是湿热处理可以降低绿豆淀粉的消化率。

3.2 活性成分

3.2.1 酚酸类

绿豆中的酚酸类物质主要包括原儿茶酸、没食子酸、阿魏酸等^[38]。酚酸类物质不稳定,浸泡一熟化工艺均会对绿豆中的酚酸类物质产生影响。刘婷婷^[39]分析发现,大部分豆类中的酚类物质在浸泡过程中显著降低,只有绿豆中的总酚含量显著增加(增加了23.17%)。李然等^[40]认为长时间浸泡会使绿豆籽粒的活化活动开始,大量水分进入籽粒内部开始参与已存在酶的活化和新酶的合成,结合型酚类物质释放,从而导致总酚含量升高,可解释绿豆酚类物质提高的现象。同时,浸泡过程可引发萌发,李丽等^[41]、张小慧等^[42]对比了萌发过程绿豆和赤小豆的根、胚、皮和茎中总酚酸和总黄酮含量,4个部位中表皮的总酚酸和总黄酮含量最高。在熟化工艺中,Valmor等^[43]研究了蒸煮加工对绿豆酚酸类化合物含量的影响,结果显示,绿豆中的酚酸类化合物总含量与蒸煮时间成反比,即蒸煮时间越长,酚酸类含量越少,表明酚酸类物质受热易分解。综上,绿豆酚酸类物质在浸泡过程中的含量增加以及蒸煮后又受热分解的规律,可为后续绿豆酚酸的利用提供思路。

3.2.2 黄酮类

绿豆中含有丰富的黄酮类物质,其中牡荆素和异牡荆素颇具代表性,分别占绿豆总黄酮含量的51.99%和45.42%^[23]。王雪等^[44]采用远红外线低温烘焙,经温度130℃,时间180min预熟化处理后的绿豆具有良好的感官特性,且处理后的牡荆苷含量 $[(0.047 \pm 0.002)\%]$ 和异牡荆苷含量 $[(0.036 \pm 0.001)\%]$ 较处理前无明显变化,说明低温烘焙是适宜绿豆干燥熟化的一种加工方法,可避免高温对绿豆中活性成分的破坏。

在不同的加工处理中,绿豆中的黄酮类物质含量会发生不同变化。在对比浸泡和蒸煮处理时发现,蒸煮处

理造成黄酮类物质的流失更严重^[39],且煮制液中的黄酮含量随煮制温度和时间的升高而升高,在达到峰值后开始下降,在最佳工艺条件下不同品种绿豆的煮制液中黄酮含量分别为1.82,1.77 mg/g^[45],与张桂芳等^[46]的研究结果相似。综上,绿豆中的黄酮类物质在预熟化工艺的浸泡和蒸煮阶段受影响程度差异较大,且在蒸煮过程中会流失到煮制液中,可为后续绿豆饮料的开发提供一种思路和数据支撑。

3.2.3 γ -氨基丁酸

γ -氨基丁酸(GABA)是动物和人体内常见的一种抑制性神经递质,具有降血压、安眠等多种功能^[47]。绿豆中GABA的研究主要集中在发芽前后含量对比^[48-49]以及发芽富集技术^[50]。针对预熟化工艺对GABA含量的影响研究较少,其中Ma等^[51]对绿豆进行蒸煮、焙烤、微波等直接处理,处理后绿豆中的GABA含量均高于原料;浸泡后绿豆中的GABA含量显著提高,由1.59 mg/100 g DW上升到32.33 mg/100 g DW,但有7.00%的GABA分布在浸泡后的溶液中,经蒸煮处理后GABA含量比浸泡时有所降低,且煮制的绿豆样品中有51.76%~62.75%的GABA被释放至煮制液中,这与GABA的水溶性有关。因此,浸泡是提高绿豆GABA含量的有效措施,而蒸煮则会降低绿豆中GABA含量,原因是蒸煮过程中GABA被释放至煮制液中。

4 结论及展望

尽管目前对绿豆预熟化工艺的研究较为广泛,但是主要的关注点仍然是工艺参数的优化以及工艺对蛋白质、淀粉的影响等方面,而对于预熟化方式对绿豆功能因子的影响研究关注较少。除了常规的浸泡、蒸煮等预熟化工艺外,目前只有少数科研人员分别在高温流化、低压蒸煮、微波膨化等方面做出了尝试,且这些尝试主要是关于与大米的共煮同熟,更多关注的是产品研发,尚需要更系统、深入地围绕绿豆尤其是其微观结构、热力学特性和糊化特性等机理方面的影响进行研究,通过提高绿豆的品质进而提高绿豆的利用率。

谷春梅等^[52]研究了蒸汽爆破技术对红豆和绿豆中多酚含量的影响,与对照组相比,经0.5 MPa,60 s爆破处理后的绿豆样品中总酚和总黄酮含量最高(分别为4.57, 3.0 mg/g);经处理(0.75 MPa,60 s)后,红豆中的总酚和总黄酮含量分别为4.66,3.07 mg/g,其中绿豆和红豆中的黄酮含量分别为对照组的1.74,2.32倍。这可能是因为在爆破加工过程中,原料微孔扩张,整体形态发生变化,物理、化学结构被破坏,形成大量碎片物质,增加了原料中活性成分与溶剂的接触面积,有利于活性成分的提取。而蒸汽爆破技术原理是高温高压使通入的水变为蒸汽进入物料内部,瞬间释压后,在热反应和机械断裂作用下,使原料组分分离和结构改变,从而促进有效成分溶出,提高内容物之间的相互接触^[53],使绿豆提前熟化成为

一种可能。因此,后续研究可以将蒸汽爆破技术与绿豆的预熟化工艺相结合进行验证。同时,可考虑将现有成熟的、新型的食品加工技术运用于杂豆的预熟化,通过改善食用品质、靶向功能因子、减少功效损失、提高效率等方面拓展精准预熟化杂豆工艺途径,为杂豆食用方式引入新的思路,满足新时代人们健康消费理念和快节奏生活需求。

参考文献

- [1] MAHGOUB S A, MOHAMMED A T, MOBARAK E A. Physiochemical, nutritional and technological properties of instant porridge supplemented with mung bean[J]. Food and Nutrition Sciences, 2020, 11(12): 2-3.
- [2] 张思维, 李东梅, 孙建云, 等. 4 种杂粮的营养价值与保健功能概述[J]. 农业科技与信息, 2022(24): 80-85.
ZHANG S W, LI D M, SUN J Y, et al. Overview of nutritional value and health function of 4 kinds of grains[J]. Agricultural Science and Technology and Information, 2022(24): 80-85.
- [3] BRISHTI F H, YEA C S, MUHAMMAD K, et al. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: Effects of extrusion on its physical, textural and protein quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67(1): 3-4.
- [4] 张桂芳, 王立东, 包国凤, 等. 利用微波干燥技术研制速熟绿豆[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(1): 52-55.
ZHANG G F, WANG L D, BAO G F, et al. Preparation of quick-cooking mung bean by microwave drying technology[J]. Food Research and Development, 2014, 35(1): 52-55.
- [5] 张桂芳, 张东杰, 王立东, 等. 速熟绿豆加工工艺的优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 205-208.
ZHANG G F, ZHANG D J, WANG L D, et al. Optimization of processing technology of quick-ripening mung bean[J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(11): 205-208.
- [6] 巩僖, 高婧譞, 张彧. 速煮绿豆冷冻干燥工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 77-79.
GONG X, GAO J X, ZHANG Y. Freeze-drying process of instant boiled mung bean[J]. Food Industry, 2019, 40(9): 77-79.
- [7] 乔筱童. 绿豆与大米共煮同熟技术的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015: 24-27.
QIAO X T. Research on co-cooking technology of mung bean and rice[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015: 24-27.
- [8] 于雷, 乔筱童, 李晓蒙. 一种与大米共煮同熟的绿豆加工技术: 201510115002.X[P]. 2018-04-06.
YU L, QIAO X T, LI X M. A mung bean processing technology for co-cooking with rice: 201510115002.X[P]. 2018-04-06.
- [9] 李晓蒙. 绿豆与大米共煮同熟工艺及其发酵酒的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016: 30-31.
LI X M. Study on co-cooking technology of mung bean and rice and fermentation wine[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016: 30-31.
- [10] 李文浩, 舒畅, 闫淑琴, 等. 蒸煮工艺参数对绿豆糊化特性的影响[J]. 食品科技, 2010, 35(3): 164-167.
LI W H, SHU C, YAN S Q, et al. Effect of cooking parameters on gelatinization characteristics of mung bean[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(3): 164-167.
- [11] 郭晨, 田晓静, 杜月红, 等. 不同预熟化处理对绿豆营养成分及蒸煮特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 27-34.
GUO C, TIAN X J, DU Y H, et al. Effects of different pre-curing treatments on nutrient composition and cooking characteristics of mung bean[J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 27-34.
- [12] 孙军涛, 张智超, 肖付刚, 等. 高温高压和常压蒸煮对绿豆糊化度的影响研究[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 103-105.
SUN J T, ZHANG Z C, XIAO F G, et al. Effect of high temperature, high pressure and atmospheric pressure cooking on gelatinization degree of mung bean[J]. Food Industry, 2019, 40(5): 103-105.
- [13] 白洁, 刘丽莎, 李玉美, 等. 红小豆蒸煮过程中的糊化特性及微观结构[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 41-46.
BAI J, LIU L S, LI Y M, et al. Gelatinization properties and microstructure of red bean during cooking[J]. Food Science, 2018, 39(7): 41-46.
- [14] MOHANTY C S, VERMA S, SINGH V, et al. Characterization of winged bean (*Psophocarpus tetragonolobus* (L.) DC.) based on molecular, chemical and physiological parameters[J]. American Journal of Molecular Biology, 2013, 15(4): 807-816.
- [15] 王大为, 董欣, 张星, 等. 不同浸泡方法对绿豆吸水特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 83-89.
WANG D W, DONG X, ZHANG X, et al. Effects of different soaking methods on water absorption characteristics of mung bean[J]. Food Science, 2017, 38(13): 83-89.
- [16] 何磊, 于宁, 陈颖. 常见加工方式对杂豆品质的影响与调控[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(1): 177-185.
HE L, YU N, CHEN Y. Effect and control of common processing methods on the quality of miscellaneous beans[J]. Journal of Cereals and Oils, 2023, 38(1): 177-185.
- [17] 刘畅. 超高压处理对全籽粒绿豆理化和加工特性的影响[D]. 沈阳: 吉林农业大学, 2020: 32-33.
LIU C. Effect of ultra-high pressure treatment on physicochemical and processing characteristics of whole seed Mung bean[D]. Shenyang: Jilin Agricultural University, 2020: 32-33.
- [18] 刘婷婷, 包佳微, 李嘉欣, 等. 浸泡和发芽对杂豆酚类物质及其抗氧化性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 26-33.
LIU T T, BAO J W, LI J X, et al. Effects of soaking and germination on phenolic substances and antioxidant properties of common bean[J]. Journal of Cereals and Oils, 2019, 34(8): 26-33.
- [19] 王英, 张建强, 李永武, 等. 不同微波条件对速熟绿豆水分含量影响的研究[J]. 粮食科技与经济, 2013, 38(3): 49-50, 53.
WANG Y, ZHANG J Q, LI Y W, et al. Effects of different microwave conditions on water content of quick-ripening mung bean[J]. Food Science and Economy, 2013, 38(3): 49-50, 53.

- [20] SRISANG N, VARANYANOND W, SOPONRONNARIT S, et al. Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(3/4): 385-392.
- [21] 徐远阳. 不同储藏期微生物活性值与小麦品质的相关性分析[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013: 14-15.
XU Y Y. Correlation analysis of microbial activity value and wheat quality in different storage periods[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2013: 14-15.
- [22] 滕菲, 李永富, 王莉, 等. 高温流化对黑米蒸煮品质的改良效果[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 21-27.
TENG F, LI Y F, WANG L, et al. Effect of high temperature fluidization on cooking quality of black rice[J]. *China Journal of Cereals and Oils*, 2017, 32(10): 21-27.
- [23] 周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(2): 16-23.
ZHOU S M, LI R N, TANG J, et al. Nutritional function of mung bean and its application in the development of plant-based food[J]. *Grain, Oil and Food Science and Technology*, 2022, 30(2): 16-23.
- [24] 张舒, 盛亚男, 冯玉超, 等. 焙烤对绿豆蛋白结构和功能性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 44-49.
ZHANG S, SHENG Y N, FENG Y C, et al. Effects of baking on structure and functional properties of mung bean protein [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 44-49.
- [25] 张俊杰, 郑嘉琛, 谢宜桐, 等. 高水分挤压温度对绿豆蛋白结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(20): 130-136.
ZHANG J J, ZHENG J C, XIE Y T, et al. Effect of high water extrusion temperature on structure of mung bean protein [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20): 130-136.
- [26] 张舒, 王长远, 盛亚男, 等. 加工方式对绿豆蛋白亚基和功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(19): 113-119.
ZHANG S, WANG C Y, SHENG Y N, et al. Effects of processing methods on subunits and functional properties of mung bean protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(19): 113-119.
- [27] MUBARAK A E. Nutritional composition and antinutritional factors of mung bean seeds (*Phaseolus aureus*) as affected by some home traditional processes[J]. *Food Chemistry*, 2005, 89(4): 489-495.
- [28] BRISHTI F H, YEA C S, MUHAMMAD K, et al. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: Effects of extrusion on its physical, textural and protein quality [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67(3): 102591.
- [29] 刘紫薇, 李欣, 高菲, 等. 煮制时间对绿豆中淀粉性质的影响及相关性分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(13): 93-99.
LIU Z W, LI X, GAO F, et al. Effect and correlation analysis of cooking time on starch properties in mung bean [J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(13): 93-99.
- [30] ROMPOTHI O, PRADIPASENA P, TANANUWONG K, et al. Development of non-water soluble, ductile mung bean starch based edible film with oxygen barrier and heat sealability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 748-756.
- [31] SHEN H, GUO Y, ZHAO J, et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 821-831.
- [32] 王艳, 张煜松, 刘兴丽, 等. 湿热处理对绿豆淀粉结构及理化特性的影响[J]. *轻工学报*, 2022, 37(3): 36-42.
WANG Y, ZHANG Y S, LIU X L, et al. Effects of moisture and heat treatment on structure and physicochemical properties of mung bean starch[J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(3): 36-42.
- [33] 王青林, 张睿, 肖建东, 等. 湿热处理对不同淀粉理化特性的影响[J]. *食品工业*, 2016, 37(12): 88-91.
WANG Q L, ZHANG R, XIAO J D, et al. Effects of moisture and heat treatment on physicochemical properties of different starches [J]. *Food Industry*, 2016, 37(12): 88-91.
- [34] 赵佳. 水—热处理对淀粉理化特性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 22-23.
ZHAO J. Effect of water-heat treatment on physicochemical properties of starch[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012: 22-23.
- [35] 杨红丹. 杂豆粉及其淀粉理化性质与功能特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 28-29.
YANG H D. Study on physicochemical properties and functional properties of mixed bean powder and its starch [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2011: 28-29.
- [36] HUONG N T M, HOA P N, VAN HUNG P. Effects of microwave treatments and retrogradation on molecular crystalline structure and in vitro digestibility of debranched mung-bean starches [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 190: 904-910.
- [37] LI W, GUO H, WANG P, et al. Physicochemical characteristics of high pressure gelatinized mung bean starch during recrystallization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131: 432-438.
- [38] SHI Z, YAO Y, ZHU Y, et al. Nutritional composition and antioxidant activity of twenty mung bean cultivars in China[J]. *The Crop Journal*, 2016, 4(5): 398-406.
- [39] 刘婷婷. 不同加工方式对杂豆酚类物质及其抗氧化性的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 31-32.
LIU T T. Effects of different processing methods on phenolic substances and antioxidant properties of common bean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019: 31-32.
- [40] 李然, 李振川, 陈珊珊, 等. 应用低场核磁共振研究绿豆浸泡过程[J]. *食品科学*, 2009, 30(15): 137-141.
LI R, LI Z C, CHEN S S, et al. Study of mung bean soaking process by low field nuclear magnetic resonance imaging[J]. *Food Science*, 2009, 30(15): 137-141.
- [41] 李丽, 张小慧, 龚盛昭, 等. 绿豆萌芽不同部位总酚酸和总黄酮量的测定及其抗氧化能力[J]. *日用化学工业*, 2015, 45(7): 393-396.
LI L, ZHANG X H, GONG S Z, et al. Determination of total

- phenolic acids and flavonoids in different parts of mung bean germination and their antioxidant capacity[J]. *Chemical Industry Daily*, 2015, 45(7): 393-396.
- [42] 张小慧, 李丽, 董银卯, 等. 赤小豆萌芽不同部位总酚酸和总黄酮含量分析及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业*, 2014, 35(10): 90-92.
- ZHANG X H, LI L, DONG Y Z, et al. Study on the contents of Total phenolic acid and total flavonoids in different Parts of Chixiao Bean sprout and their antioxidant activities [J]. *Food Industry*, 2014, 35(10): 90-92.
- [43] VALMOR Z I D A V. Effects of storage period and temperature on the technological properties, starch digestibility, and phenolic compounds of mung beans (*Vigna radiata* L.)[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2020, 89: 1-11.
- [44] 王雪, 肖萍, 王步江, 等. HPLC 法测定低温烘焙绿豆中牡荆苷与异牡荆苷的含量及变化[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(10): 152-157.
- WANG X, XIAO P, WANG B J, et al. Determination of vitexin and isovitexin in low-temperature roasted mung bean by HPLC [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(10): 152-157.
- [45] 张静祎, 翟爱华, 王佳男. 煮制加工对不同绿豆中黄酮含量的影响及抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(3): 155-162.
- ZHANG J W, ZHAI A H, WANG J N. Effects of cooking and processing on flavonoid content and antioxidant activity in different mung beans[J]. *Chinese Food Additives*, 2020, 31(3): 155-162.
- [46] 张桂芳, 于金池, 王颖, 等. 煮制加工对绿豆中黄酮含量的影响[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(4): 38-41.
- ZHANG G F, YU J C, WANG Y, et al. Effect of cooking and processing on flavonoid content in mung bean[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(4): 38-41.
- [47] HAN S, LIU H, HAN Y, et al. Effects of calcium treatment on malate metabolism and γ -aminobutyric acid (GABA) pathway in postharvest apple fruit[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127479.
- [48] 石磊, 刘超, 周柏玲, 等. 萌发条件对绿豆芽中 γ -氨基丁酸含量的影响研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(3): 50-53.
- SHI L, LIU C, ZHOU B L, et al. Effects of germination conditions on gamma-aminobutyric acid content in mung bean sprouts[J]. *Food and Oil*, 2019, 32(3): 50-53.
- [49] 姜宇婷. 绿豆发芽过程中组分及营养变化研究进展[J]. *现代农业科技*, 2020(14): 209-214.
- JIANG Y T. Research progress of components and nutritional changes of mung bean during germination[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(14): 209-214.
- [50] 马玉玲, 罗可大, 佟立涛, 等. 绿豆发芽富集 GABA 及产品开发生研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(5): 119-127.
- MA Y L, LUO D K, TONG L T, et al. Research progress on GABA enrichment in mung bean germination and product development[J]. *Journal of Cereals and Oils*, 2018, 33(5): 119-127.
- [51] MA Y L, WANG A X, YANG M, et al. Influences of cooking and storage on γ -aminobutyric acid (GABA) content and distribution in mung bean and its noodle products[J]. *LWT*, 2022, 154: 112783.
- [52] 谷春梅, 候春宇, 程安玮. 蒸汽爆破对红豆和绿豆多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(7): 1 574-1 582.
- GU C M, HOU C Y, CHENG A W. Effects of steam blasting on polyphenol content and antioxidant activity of red bean and mung bean[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2021, 35(7): 1 574-1 582.
- [53] GONG L, HUANG L, ZHANG Y. Effect of steam explosion treatment on barley bran phenolic compounds and antioxidant capacity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(29): 7 177-7 184.
- EDTA, and NTA by UV-visible spectrometry and HPLC [J]. *Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 2005, 382(7): 1 601-1 609.
- [15] 程嘉雯. 复杂基质中氮川三乙酸的分离富集和色谱分析研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- CHENG J W. The separation and preconcentration of nitrotriacetic acid for chromatographic analysis in complex matrix[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.
- [16] WANG X M, YANG W T, WANG K, et al. Determination of EDTA in Chinese medicine injection by high performance liquid chromatography [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2012, 22(5): 1 000-1 002.
- [17] 魏峰, 霍军生, 于波, 等. 营养强化剂乙二胺四乙酸铁钠中氨基三乙酸的检测方法研究[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(4): 321-323.
- WEI F, HUO J S, YU B, et al. Determination of nitrilotriacetic acid in sodium iron (III) ethylenediaminetetraacetate for nutritional fortifier[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009, 30(4): 321-323.

(上接第 77 页)

- [11] 乌吉木. 高效液相色谱法测定番茄酱中乙二胺四乙酸二钠[J]. *粮食流通技术*, 2021(24): 208-212.
- WU J M. Determination of EDTA in tomato sauce by HPLC[J]. *Grain Distribution Technology*, 2021(24): 208-212.
- [12] 杨长志, 韩广源, 姜冰, 等. UPLC-MS-MS 法测定八宝粥罐头中乙二胺四乙酸二钠残留量[J]. *食品科学*, 2015, 36(4): 208-212.
- YANG C Z, HAN G Y, JIANG B, et al. Determination of ethylenediaminetetraacetic acid disodium residues in canned eight-ingredient porridge by UPLC-MS-MS[J]. *Food Science*, 2015, 36(4): 208-212.
- [13] 许迪明, 宓捷波, 湛嘉. IC 法测定食品添加剂 EDTA 二钠中氨基三乙酸[J]. *中国食品添加剂*, 2016(11): 208-212.
- XU D M, MI J B, ZHAN J. Determination of nitrilotriacetic acid in food additive disodium ethylenediaminetetraacetate by ion chromatography[J]. *China Food Additives*, 2016(11): 208-212.
- [14] LAINE P, MATILAINEN R. Simultaneous determination of DTPA,