

杂豆中抗营养因子的检测及其消除方法研究进展

薛璐璐，阮长青，张东杰，李志江

Research Progress in Detection and Elimination of Anti-nutritional Factors in Pulses

XUE Lulu, RUAN Changqing, ZHANG Dongjie, and LI Zhijiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050041>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

食品中PCDD/Fs和dlPCBs的检测方法研究进展

Progress on detection methods of PCDD/Fs and dl-PCBs in food

食品工业科技. 2018, 39(2): 331–337,343 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.061>

荧光标记免疫层析技术在食品安全检测中的应用研究进展

Progress of application of immunochromatographic technology labeled with fluorescence element in food safety detection

食品工业科技. 2018, 39(2): 314–319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.058>

环介导等温扩增技术在食品安全检测领域的应用研究进展

Application research progress on loop-mediated isothermal amplification in food safety detection

食品工业科技. 2018, 39(10): 330–334 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.10.061>

动物源性食品安全检测技术研究进展

Research Progress on Detection Techniques for Animal Derived Food Safety

食品工业科技. 2018, 39(20): 314–319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.053>

基于适配体的荧光纳米探针在食品安全检测中的研究进展

Research progress of fluorescent nano probe based on aptamer in food safety detection

食品工业科技. 2017(10): 395–399 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.10.068>

香辛料食品安全风险因子研究进展

Research Progress on Food Safety Risk Factors of Spices

食品工业科技. 2020, 41(14): 323–328,336 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.052>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

薛璐璐, 阮长青, 张东杰, 等. 杂豆中抗营养因子的检测及其消除方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 335–343. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050041

XUE Lulu, RUAN Changqing, ZHANG Dongjie, et al. Research Progress in Detection and Elimination of Anti-nutritional Factors in Pulses[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 335–343. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050041

· 专题综述 ·

杂豆中抗营养因子的检测及其消除方法研究进展

薛璐璐, 阮长青*, 张东杰*, 李志江

(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 杂豆中除了含有丰富的营养及生物活性物质外, 还含有植酸、皂苷、胰蛋白酶抑制剂、凝集素等抗营养因子, 这些物质种类多、检测过程复杂、检测能力各不相同。采用一定的处理方法不仅可以破坏它们的结构、降低含量, 而且能在加工过程中最大程度保留杂豆中的营养成分。本文详细评价了抗营养因子的检测方法, 分析、比较了多种检测方法的优缺点、适用范围、灵敏度, 并介绍了以热处理为主的几种常见抗营养因子消除方法的原理、流程、抑制效果、优缺点。旨在为杂豆中抗营养因子的分析方法选择、改进及其控制提供一些参考。

关键词: 杂豆, 抗营养因子, 热处理, 检测方法, 食品安全

中图分类号: TS214

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)07-0335-09

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2023050041](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050041)

本文网刊:



Research Progress in Detection and Elimination of Anti-nutritional Factors in Pulses

XUE Lulu, RUAN Changqing*, ZHANG Dongjie*, LI Zhijiang

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: In addition to containing rich nutrients and biologically active substances, the pulses contain phytic acid, saponins, trypsin inhibitors, lectins and other anti-nutritional factors, which have multiple types and entail complex detection processes, with different detection capabilities required. In certain treatment methods, their structures can be destroyed, and their content can be lowered, furthermore, the nutrients in pulses can be preserved to the maximum extent during processing. This paper evaluates the detection methods of anti-nutritional factors in detail, analyzes and compares the advantages, disadvantages, applicability and sensitivity of different detection methods, and introduces the principles, processes, inhibition effects, advantages and disadvantages of several common anti-nutritional factor elimination methods, focuses mainly on heat treatment. This study aims to provide some references for the analytical method selection, improvement and control of anti-nutritional factors in pulses.

Key words: pulses; anti-nutritional factors; heat treatment; detection method; food safety

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 国家重点研发计划: 杂粮食品精细化加工关键技术合作研究及应用示范 (2018YFE0206300); 黑龙江省自然基金研究团队项目: 杂粮与主粮复配科学基础及慢病干预机制 (TD2020C003); 黑龙江省杂粮产业技术创新体系杂粮食品加工技术协同创新岗、优势特色学科资助项目 (黑教联[2018]4号); 黑龙江八一农垦大学“三横三纵”科研创新团队项目: 杂粮营养与质量安全 (TDJH201806)。

作者简介: 薛璐璐 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与质量安全, E-mail: 632182056@qq.com。

* 通信作者: 阮长青 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: cqruan@163.com。

张东杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: byndzdj@163.com。

杂豆是除高脂肪豆科植物的其他食用豆类的总称,具有高淀粉、高蛋白质、高纤维、低脂肪的特点,含有丰富的维生素、矿物质以及生物活性物质^[1]。此外,还含有对营养物质的消化、吸收和利用产生不利影响以及使人和动物产生不良反应的抗营养因子,主要包括植酸、皂苷、胰蛋白酶抑制剂和凝集素等,其主要通过与内源性蛋白质结合、螯合金属离子、干扰机体利用维生素等表现方式减少机体对蛋白质、能量等营养物质的利用^[2-3]。

抗营养因子的检测方法有多种,但不同方法的检测能力、可靠性及经济性等评价指标各不相同,传统的检测方法大多不能区分出抗营养因子的结构及其降解产物,灵敏度不高,而使用精密仪器分析的方法虽能够克服以上缺陷,但前处理繁琐,检测时间长、成本高。抑制抗营养因子能有效提高杂豆中营养成分的利用率,减少不良反应的发生。其中热处理作为一种最为常用的加工方式,既保留了杂豆中的主要营养成分,又有效消除了其中的抗营养因子,操作便捷、适用性强。此外,杂豆加工过程的脱皮、发芽、发酵,也可以减少其中的抗营养因子。

本文总结了植酸、皂苷、凝集素和胰蛋白酶抑制剂的几种检测方法,分析了其优缺点、适用对象及检测范围,并阐述了常见抗营养因子的消除方法、抑制效果及其优缺点,以期为杂豆食品中抗营养因子的检测方法的选择、改进以及有效控制提供参考。

1 抗营养因子检测方法

1.1 植酸

植酸(IP_6)是由肌醇环和六个磷酸盐基团组成,在植物体内主要是以铁、锌、钙、镁等金属离子形成的复盐形式存在于谷物、豆类以及油料作物的种子和胚中^[4]。因其具有良好的螯合性能,可以迅速与金属离子结合形成稳定的螯合物,与体内蛋白质形成难以降解的复合体,破坏生物体内的正常生理活动;同时也是导致生物体不能良好吸收矿物质离子的主要原因^[5-8]。植酸通过处理后可降解为低肌醇磷酸盐(IP_5 、 IP_4 、 IP_3 等),从而降低抗营养作用。植酸的主要测定方法有分光光度法、石墨烯量子点法和离子色谱法。

1.1.1 分光光度法 国家标准“食品中植酸的测定(GB 5009.153-2016)”中规定了分光光度法测定植酸的原理,即植酸与三氯化铁-碘基水杨酸混合液发生褪色反应,用分光光度计在波长500 nm处测定吸光度,计算试样中植酸含量^[5,7]。采用分光光度法检测扁豆、鹰嘴豆等食用豆类中的植酸,在一定线性范围内测定结果误差小,此法与高效液相色谱法相比较,经方差分析测定结果无显著性差异^[9-10]。该方法不需要昂贵的仪器,操作简单易行,测定结果准确,检测时间短,适用于大批量且不需要区分降解产物样品的测定,是目前测定植酸含量最常用的方法。

1.1.2 石墨烯量子点法 以仙人掌提取物为原料通

过微波处理合成石墨烯量子点(GQDTs),将其作为猝灭剂加入到测定样品中,由于GQDTs与植酸中的磷酸基团发生静电相互作用从而放大荧光猝灭现象,可采用荧光光谱测定体系的荧光强度并计算出植酸的含量,此方法可以消除测定时荧光传感机制中无机离子的干扰^[11-12]。采用石墨烯量子点法测定植酸含量时,磷酸盐浓度在0~500 mmol/L内与荧光强度具有二次函数关系,斑豆和燕麦的植酸含量均在此参考范围内^[13]。证明此方法具有快速、稳定、灵敏度高、选择性高等优点。

1.1.3 离子色谱法 植酸离子色谱法分析是利用被分离组分与固定相之间发生离子交换的能力差异对样品中 IP_6 、低肌醇磷酸盐分离、测定^[14]。使用此方法对豆类中的植酸进行测定,在植酸含量8.3~1250 $\mu\text{mol/L}$ 范围内,线性关系良好,测定结果误差小,重复性好^[15]。扁豆中的植酸含量,在1.08~53.76 mmol/L范围内,线性关系良好,样品回收率高,测定结果重复性好,精确度、准确性高^[16]。但该方法测定的 IP_6 值低于分光光度法的结果,可能是由于在低pH条件下的提取物中的金属离子与蛋白质会干扰 IP_6 ,使测定结果偏低,但可以通过将pH调至中性来避免干扰。说明该方法灵敏度较强,可以分离肌醇磷酸酯及其不同的异构体,可在一定程度上区分异构体。

1.2 皂苷

皂苷是由皂苷元与糖构成,具有非挥发性的表面活性次生代谢产物;按照皂苷元的不同可分为三萜皂苷和甾体皂苷,杂豆中广泛存在的为三萜皂苷^[17]。皂苷产生溶血的原因是皂苷与红细胞膜中的胆固醇基团相互作用,导致红细胞膜破裂^[18]。皂苷还能够使消化酶如淀粉酶、葡萄糖苷酶、糜蛋白酶和脂肪酶的活性被抑制,这也是引起生物消化不良的主要因素^[19]。目前测定皂苷的方法主要有香草醛-高氯酸比色法、酶标仪分光光度法和高效液相色谱-质谱联用法三种。

1.2.1 香草醛-高氯酸比色法 三萜皂苷中不含有发色和助色基团,使用香草醛-高氯酸与三萜皂苷反应后形成发色团,可采用可见分光光度仪测定。采用香草醛-高氯酸法对白扁豆中的三萜皂苷含量进行测定,结果表明,其平均含量为528 mg/g,重复性实验的相对标准偏差(RSD)为0.9%,加标回收率较高,在对比四种显色体系(高氯酸、浓硫酸-甲醇、香草醛乙醇-浓硫酸、香草醛冰醋酸-高氯酸-冰醋酸)发现此法最为简便可靠^[20-21]。该方法所需仪器和试剂常见、方法简单,可减小糖类的干扰,是测定皂苷最常用的方法。

1.2.2 酶标仪分光光度法 酶标仪分光光度法主要采用的显色体系为香草醛-高氯酸-冰乙酸体系,在酶标仪上对样品中的三萜皂苷进行三波长比色法定量,能够在多孔酶标板上对多个样品进行点样,在短时间内测定多个样品,采用三波长法校正吸光值,可在一

定程度上消除干扰物质和本底漂移对定量分析造成的影响。鹰嘴豆中三萜皂苷的定量分析体现出良好的线性范围, 相关系数较高, 加标回收率 95.57%, 最低检出限为 16.657 μg/mL, 重复性实验的变异系数为 3.37%^[22], 表明该方法的准确性高, 重现性好。

1.2.3 高效液相色谱-质谱联用法 高效液相色谱-质谱联用法(HPLC-MS)采用选择性吸附、选择性洗脱的方式对样品进行富集、分离、净化, 再结合 HPLC-MS 的高灵敏度, 可以分离出不同皂苷单体, 并可以对总皂苷和皂苷单体进行定量。利用 HPLC-MS 法对意大利扁豆中皂苷 I 和 βg 进行测定, 结果表明该方法在一定范围内线性关系良好, 样品回收率高, 重复性实验误差小; 在 15 min 内可以对豆类中 20 种皂苷进行表征^[23-24]。该方法可以对总皂苷和皂苷单体进行定性和定量分析, 对比传统检测方法, 测定的结果更准确、灵敏, 且检测时间短, 但前期处理时间长, 操作步骤繁琐, 仪器昂贵, 对操作人员专业性要求高。

1.3 凝集素

植物凝集素是植物界中存在的非免疫来源蛋白质, 其结构中含有一个或多个能够可逆结合到特异单糖或多糖上的非催化结构域^[25]。植物凝集素最早发现于豆科植物中, 主要存在于植物的种子中, 起到防治细菌侵害的作用。凝集素可以与血红细胞表面的糖蛋白结合, 从而导致细胞间形成相互交叉的网状结构, 导致血液凝集; 一般动物食用后会破坏动物肠细胞的运输功能和水解功能从而影响其对营养物质的消化、吸收和利用, 还有一些凝集素被动物摄入后会使其产生 IgE 抗体, 发生过敏反应^[26-27]。目前凝集素的测定方法主要有双缩脲法和血凝法。

1.3.1 双缩脲法 双缩脲试剂在强碱性条件下与硫酸铜发生反应, 生成紫色络合物, 紫色络合物颜色的

深浅程度与样品中具有特异糖结合活性的蛋白含量成正比, 从而可以快速检测杂豆中凝集素含量^[28]。王琇钧^[29]使用此方法对小扁豆凝集素的测定结果表明, 小扁豆中的凝集素含量变异系数小于 1%, 连续多次重复实验的标准差在 0.38%~0.87%。将双缩脲法与凯氏定氮法的测定结果进行对照, 发现双缩脲法与凯氏定氮法结果相似度高, 且该方法耗样量少, 耗时短, 受蛋白质特异性影响小。

1.3.2 血凝法 凝集素能与兔血中的糖蛋白进行特异性结合, 使红血球发生沉降, 利用这一特点可以对凝集素进行较准确的测定^[30]。利用血凝法对豆类饲料中的凝集素测定, 测定结果表明该方法的加标回收率高, 准确度和精确度的平均相对偏差较小^[31], 但红细胞凝集素会受到许多自身和外界因素干扰, 所以一般用于半定量分析。通过对红细胞修饰和经过蛋白酶的修饰来提高红细胞的灵敏度, 在测定刀豆中凝集素含量时加入 1.75 U/mL 的胰蛋白酶可以将血凝活力测定值提高 8 倍^[32]。该方法为目前凝集素常用的测定方法, 操作简单, 快速, 是植物凝集素含量初步评价的重要环节, 适用于具有活性的多价态凝集素的检测。

1.4 胰蛋白酶抑制剂

胰蛋白酶抑制剂是一种小分子多肽或蛋白, 能够抑制胰蛋白酶的水解活性, 主要存在于植物的种子、根和茎中, 参与调节种子休眠期和萌发期时内源性蛋白酶的活力, 还具有抗虫和抗菌的作用, 保护植物不受病虫害侵扰; 但是能与人和动物小肠液中的胰蛋白酶结合, 使胰蛋白酶被消耗、活性下降, 对肠道中蛋白质的消化、吸收及利用产生影响^[33]。目前检测胰蛋白酶抑制剂的方法主要是可见分光光度法。

美国油类化学家学会标准(AOCS)“Ba 12-75”利用 N-苯甲酰-DL-精氨酸对硝基苯酰胺盐酸盐

表 1 抗营养因子的分析方法比较

Table 1 Comparison of analysis methods for anti-nutritional factors

成分	方法	优缺点	适用对象	线性范围	检测能力、可靠性
植酸	分光光度法	应用时间长, 技术成熟, 耗时短; 需标准品。	食用豆类中植酸(不区分植酸及降解产物)。	0.5~57 mg	灵敏度、精密度、准确度较低; 成本较低、操作较简便。
	GQDTs法	受无机离子影响小, 低毒性; 易聚集猝灭, 不稳定。	适用于大部分植物中植酸的测定。	0~500 mmol/L	灵敏度、精密度、准确度较高; 成本较高、操作较繁琐。
	离子色谱法	检测速度快, 不需纯化; 对操作人员要求高。	谷物、油料、豆类中植酸及其降解产物。	1.08~53.76 mmol/L	灵敏度、精密度、准确度高; 成本较高、操作较繁琐。
皂苷	香草醛-高氯酸法	应用时间长, 操作简便; 显色剂专一性差, 还会随温度和时间变化。	豆科中三萜皂苷。	0.0096~0.0192 mg/mL	灵敏度低, 精密度、准确度较高; 成本较低、操作较简单。
	酶标仪分光光度法	分析速度快, 自动化程度高, 显色稳定性高。	谷物、食用豆类中总皂苷。	0.08~0.56 mg/mL	灵敏度、精密度、准确度较高; 成本较高、操作繁琐。
	HPLC-MS法	分析结果准确, 可分别测出皂苷单体含量。	豆类中所有皂苷。	—	灵敏度、精密度、准确度高; 成本高、操作繁琐。
凝集素	双缩脲法	操作简单, 耗时少; 受环境影响大。	豆类、谷物中大部分凝集素。	2~6 mg	灵敏度较低、精密度、准确度高; 成本低、操作简单。
	血凝法	应用广泛; 含量较低时, 误差较大。	有活性的多价态凝集素。	100~500 mg/L	灵敏度、精密度、准确度较高; 成本较高、操作简单。
胰蛋白酶抑制剂	可见分光光度法	常用的方法; 实验条件要求高, 试剂不易存放。	豆类、谷物中胰蛋白酶抑制剂。	—	灵敏度、精密度、准确度较高; 成本高、操作繁琐。

(BAPNA)与胰蛋白酶反应生成在波长 410 nm 有特征吸收峰的对硝基苯胺,而胰蛋白酶抑制剂可抑制反应的发生,利用此原理测定产物吸光度值从而对胰蛋白酶抑制剂进行定量分析^[34]。利用此方法对大豆、杂豆、谷物及其制品中的胰蛋白酶抑制剂进行连续多次重复实验,结果重复性较好,但对胰蛋白酶抑制剂含量过低的样品测定时结果误差较大^[35]。这种方法操作比较简单,使用的仪器常见,但胰蛋白酶的活性、溶液的 pH 都会影响测定结果,且底物 BAPNA 价格昂贵,不利于工厂实际检测。

上述抗营养因子的分析方法见表 1。

2 消除抗营养因子的方法

对于抗营养因子的消除方法的研究,目前最为深入、应用最为广泛的就是热处理方法,热处理方法主要包括蒸煮处理、高温高压处理、微波加热处理、焙烤处理、射频加热处理和挤压膨化处理等。热处理可以抑制大部分抗营养因子,且操作方便、时间短、安全性高,在日常生产生活中最常用,除热处理外,脱皮、发芽、发酵也可以对抗营养因子进行抑制。

2.1 热消除方法

2.1.1 蒸煮 蒸煮是一种较为典型的表面热传导技术,以热水或热蒸汽为介质将热量从物料表面逐层传入内部,使蛋白质变性,控制酶和其他化学反应,降低抗营养因子含量而不会对杂豆造成任何物理损害^[36]。

Khatta 等^[37]对豇豆和豌豆蒸煮 35 min、芸豆蒸煮 45 min 后,植酸、单宁含量显著下降,而胰蛋白酶抑制剂被完全去除。植酸和单宁含量下降的原因可能是在蒸煮过程中,植酸和单宁浸出到水中或者在蒸煮过程中出现受热降解。Hefnawy^[38]发现扁豆蒸煮 90 min 后,对胰蛋白酶抑制剂和植酸的抑制效果明显,而对单宁的抑制效果较差。蒸煮处理对胰蛋白酶抑制剂的抑制效果极显著,可能是由于蒸煮使热敏性蛋白变性失活,从而抑制胰蛋白酶抑制剂,在蒸煮过程中使用水作为传热介质导致杂豆中胰蛋白酶抑制剂含量显著降低。

蒸煮的处理时间较长,传统的蒸煮处理加热设备简单、操作方便,成本低,对操作人员的专业性要求不高,对比其他处理更适用于烹饪和工厂生产中使用。可以通过先对杂豆进行浸泡、脱皮的方法来减少蒸煮时间,提高抗营养因子的抑制效果。

2.1.2 高温高压 高温高压处理技术是指在液体介质中放入物料,通过利用加热产生蒸汽,随着蒸气量的增加,容器内的压力也不断增加,温度也会随之升高,在一定压力下,会导致食品中生物大分子物质变性失活和糊化,高温高压处理可以破坏蛋白质结构、崩溃与变性酶的空间结构,还可改变酶活性中心甚至可以导致其丧失活性,催化活性也会被改变^[39]。

Rehman 等^[40]对食用豆类进行高温高压处理后,植酸和单宁的含量分别降低了 33.1%~45.7% 和 28.0%~51.6%。Xu 等^[41]发现鹰嘴豆浸泡后进行高

温高压处理 20 min 后,植酸含量可以下降 54.4%。小扁豆在 121 ℃ 下处理 35 min,胰蛋白酶抑制剂含量下降了 93.3%,同时单宁和植酸的含量也分别下降了 35.9% 和 41.6%^[38]。植酸含量明显下降可能是由于部分植酸在压热过程中化学结构发生变化导致植酸降解为低肌醇磷酸盐,也可能是在处理过程中植酸与一些蛋白或矿物质形成了不溶的络合物。Mubarak^[42]发现绿豆浸泡 12 h 后在 121 ℃ 下加热 35 min,单宁含量下降了 51.5%,可能除浸泡过程中的溶出外,在处理过程中不可溶的单宁-蛋白复合物的形成也是单宁含量下降的一个重要原因。Shi 等^[43]将未经浸泡、浸泡 6 h 的海军豆在高压处理 15 min 后,皂苷的含量分别下降了 73.4% 和 92.3%。高压和高温结合的高能级,导致皂苷元和糖等成分的分解从而造成皂苷的严重降解。

采用高温高压处理的优点为受热均匀,表皮颜色变化小;无污染,且较蒸煮法耗能低,减少环境污染。但是高温高压处理设备投资成本太高、安全性不确定,加热时间长。可以先对杂豆进行超声或其他方法处理后,再进行高温高压处理来减少加热时间、提高效率,同时也能更好地抑制抗营养因子。

2.1.3 微波加热 微波加热主要通过高频率使分子剧烈运动并发生碰撞产生大量的热量,将电能转化为热能。微波加热处理时,部分抗营养因子受到高频率的作用而发生剧烈运动,由内而外的产生热量,使得蛋白质等分子结构发生改变,从而破坏杂豆中的抗营养因子^[44]。

Xu 等^[41]发现,在室温下鹰嘴豆与水的比例 1:10,浸泡 16 h 后,微波加热处理 15 min,浸泡和未浸泡植酸含量分别下降 25% 和 21%,可能是由于浸泡提高了植酸酶的活性和植酸的溶解性,导致经过微波处理后植酸含量下降更多。黑豆经微波处理后,单宁、植酸含量分别下降了 26.2% 和 26.5%,胰蛋白酶抑制剂的含量下降了 9.5%^[45],类似的处理方法使黑豆的胰蛋白酶抑制剂含量下降了至少 50%^[46]。这可能是因为杂豆中存在 Kunitz(KTI)和 Bowman-Birk(BBI)两种典型的胰蛋白酶抑制剂分别为热不稳定和热稳定的,而导致此结果的原因可能是由于两篇文献使用的黑豆品种不同,KTI 和 BBI 的含量不同。Vashishth 等^[47]将硬皮豆过夜浸泡后在微波功率为 800 W 时加热 30 min,发现植酸、单宁含量分别下降了约 53.8% 和 64.7%,胰蛋白酶抑制剂由 998 U/g 下降至 207 U/g。单宁含量显著下降的原因可能是单宁主要存在于种皮中,具有水溶性,也可能与单宁的热不稳定性及在热处理后单宁的降解有关。

相比于常规加热,微波加热可以减少加热和冷却的时间,快速加热可以减轻营养物质长时间高温处理的分解,而且,能源效率高,产生的污染小。但也存在着温度分布不均匀,导致部分中心区域的温度远高于样品平均温度。未来,微波可以结合其他物理法、

化学法或微生物法,最大限度地提高对抗营养因子钝化效率,将对杂豆的损害降至最低。

2.1.4 射频加热 射频是一种在 1~300 MHz 之间的电磁波,射频加热机制主要有两种,一种是离子导热,在交流电场的作用下,样品内的离子相互碰撞,从而产生热量;另一种是偶极转动,样品在交流电场中,内部的水分子(极性分子)发生电偶极矩转向,而非极性分子会在电场作用下变为极性分子,并随电场极性变化产生旋转,使分子间摩擦产生热量,使样品从内到外传热^[48]。

王竹怡^[49]发现,将黑豆浸泡 1 h 后放在射频设备中 27 MHz 下处理 30 min,黑豆内的抗营养因子含量都相对降低,其中皂苷含量下降了 22.1%,胰蛋白酶抑制剂下降了 15.5%。Zhong 等^[45]发现将黑豆浸泡 30 min 后在射频设备中处理 30 min,皂苷和植酸得到了较好的抑制,但单宁含量只下降了 17.7%。与其他消除方法相比较,射频处理对单宁的抑制效果并不显著,可能是由于处理时浸泡时间过短,导致黑豆中单宁溶出较少。Adedayo 等^[50]发现鹰嘴豆和红扁豆经过射频加热处理后,随着温度和射频功率的增加,胰蛋白酶抑制剂的活性显著降低。

射频加热是利用电磁波使食品分子运动,在运动过程中温度会逐渐升高,从而达到加热效果的一种新型的加热方式^[51]。与传统的加热方法相比,加热速度快、穿透深度大,处理时间短,对营养物质的破坏小,但对于抗营养因子的抑制效果不如高温高压处理。另外,射频加热设备投资较大,限制了射频加热技术在食品工业中的应用。未来可结合其他一些处理方法或对射频加热的条件进一步探究,在保证营养物质不被破坏的同时提高对抗营养因子的抑制效果。

2.1.5 烤焙 烤焙主要有空气对流传热和热辐射传热两种传热方式,主要通过电加热设备实现,当电流通过电热元件时散发热量,将热能转化为物料的内能^[52]。可以将热量以空气为介质传递到食品表层及内部,从而改变食品内部结构,达到消除抗营养因子的目的。

Yang 等^[46]发现,将黑小豆放入 180 °C 烤箱中处理 20 min,植酸、胰蛋白酶抑制剂和单宁含量分别下降 14.37%、52.54% 和 14.46%。Osman^[53]发现扁豆进行烘烤加热后,植酸和胰蛋白酶抑制剂的含量分别降低了 60.7% 和 23.1%,而单宁含量反而升高。Mugabo 等^[54]对四棱豆进行烘烤处理后植酸、胰蛋白酶抑制剂和单宁含量分别下降了约 85.5%、33.6% 和 50.0%。可能是热处理抑制了多酚氧化酶,更多的多酚从复合物中释放出来,也可能是不可溶聚合物水解成小分子的可溶聚合物所致。

焙烤处理是通过空气对流和热辐射方式进行传热,使食品由外而内的进行加热,可以有效地保留食品中的水分^[55]。相比射频加热和高压高温设备,焙烤处理的设备投资低,应用范围广。

2.1.6 挤压膨化 挤压膨化处理是一种高温、短时的过程,将豆粉和水的混合物经过一个称为热塑性熔融的过程,对杂豆粉施加的高温和高压导致豆类蛋白质变性和混合物的膨化。挤压过程会破坏抗营养因子,增加可溶性膳食纤维,使淀粉糊化,并减少脂质氧化^[36]。

Ciudad 等^[56]将扁豆在 160 °C 下进行挤压膨化处理,胰蛋白酶抑制剂和凝集素的抑制率都在 90% 以上,但对植酸的抑制率小于 20%。Alonso 等^[57]发现,芸豆和蚕豆在 156 °C 进行挤压膨化处理后,胰蛋白酶抑制剂和凝集素的抑制率都在 90% 以上,单宁的抑制率也在 50% 以上,但植酸的抑制率只有 20% 左右。挤压处理对胰蛋白酶抑制剂和凝集素的抑制效果都极显著,对单宁的抑制效果也较好,但对植酸的抑制效果较一般。

挤压膨化处理现普遍应用于生产各种杂豆即食食品,与其他消除方法相比较,挤压膨化处理无法保留杂豆原有的形态,经挤压膨化处理后的杂豆可以直接食用。但挤压膨化对植酸的抑制效果不佳,可以结合脱皮或浸泡等方法来提高对植酸抑制效果。

2.2 其他处理方式

2.2.1 脱皮 脱皮是一个机械过程,通过手工或机器的方式将杂豆的种皮脱去,杂豆中的单宁大都存在于种皮中,脱皮可以显著减少单宁含量。Alonso 等^[57]发现,脱皮后的芸豆和蚕豆中单宁的下降率均大于 90%,但对于其他抗营养因子的抑制效果不突出。Alonso 等^[58]对豌豆进行脱皮后,只有单宁的含量下降。杂豆种类和品种会影响脱皮对抗营养因子的抑制效果,但可以将其他处理方法和脱皮相结合来更好地抑制抗营养因子。

2.2.2 发芽 在发芽过程中会激活杂豆中的植酸酶,破坏植酸的鳌合作用,使营养物质和其他植物化学物质游离,从而使机体易于消化吸收,同时多酚氧化酶活性增高,使单宁含量下降。蚕豆和芸豆在发芽 72 h 后,蚕豆中植酸和单宁含量下降 60% 以上,芸豆中单宁的含量下降 71.6%,但对于胰蛋白酶抑制剂的抑制效果要低于热处理,对扁豆中胰蛋白酶抑制剂的抑制率低于 20%^[54,57]。发芽会改变杂豆的营养水平、生化特性和物理特性。发芽是一种常见的抑制抗营养因子的方法,操作简单,对环境要求不高,可以有效抑制抗营养因子,但发芽会改变杂豆原有形态形成豆芽,不适用需要使用原豆为原料的食品。

2.2.3 发酵 发酵是通过微生物及其酶的活动对杂豆进行生化修饰的加工方式。发酵的底物可以是原豆、研磨产品或加工产品。发酵可通过自然发酵或经挑选的纯培养物启动。Sharma 等^[59]发现,缘豆发酵后,植酸、凝集素、单宁和胰蛋白酶抑制剂含量均显著下降。Khatta 等^[37]发现发酵后的豌豆和芸豆,单宁的含量下降率大于 70%,而植酸和胰蛋白酶抑制剂的含量下降率大于 40%。因为发酵可以降低

pH, 而低 pH 环境可以很好地降解单宁, 并为植酸酶的激活提供良好的条件。目前豆类发酵食品深受欢迎, 在发酵过程中不仅能产生多种活性物质, 还能提高消化率和微量营养素的利用率并减少抗营养因

子。未来可以通过发酵前期对杂豆进行浸泡、热处理等, 使凝集素、胰蛋白酶抑制剂等对热敏感的抗营养因子含量下降, 来提高抑制效果。

以上几种抗营养因子的消除方法的比较见表 2。

表 2 抗营养因子消除方法比较

Table 2 Comparison of elimination methods for anti-nutritional factors

处理方式	杂豆	抗营养因子	消除率(%)	处理参数	优缺点	文献
蒸煮	豇豆	植酸	55.8			
		单宁	72.2			
	豌豆	胰蛋白酶抑制剂	100	室温, 料液比1:5, 浸泡4 h, 蒸煮处理35 min。		
		植酸	54.7			
	芸豆	单宁	92.7			
		胰蛋白酶抑制剂	100		加热设备简单、操作方便, 成本低, 对操作人员的专业性要求不高, 对比其他处理更适用于日常家庭和工厂生产中使用。	[37]
	扁豆	植酸	57.6			
		单宁	99.3	室温, 料液比1:5, 浸泡4 h, 蒸煮处理45 min。		
	食用豆	胰蛋白酶抑制剂	100			
		植酸	44.9			
高温高压	鹰嘴豆	单宁	15	室温, 料液比1:10, 过夜浸泡, 蒸煮处理90 min。		[38]
		胰蛋白酶抑制剂	66.7			
	小扁豆	植酸	33.1~45.7	室温, 料液比1:5, 浸泡4 h, 121 °C处理90 min。		[40]
		单宁	28~51.6			
	绿豆	植酸	54.4	室温, 料液比1:10, 浸泡16 h, 压力锅中处理20 min。		[41]
		胰蛋白酶抑制剂	93.3		处理时间短, 受热均匀, 表皮颜色变化小; 较蒸煮法耗能低, 环境污染小。	
	海军豆	单宁	35.9	料液比1:10, 121 °C处理35 min。	设备投资成本高, 安全性不确定, 容积小。	[38]
		植酸	41.6			
	黑豆	单宁	51.5	室温, 浸泡12 h, 121 °C加热35 min。		[42]
		植酸	92.3	浸泡6 h后, 高压灭菌锅中加热15 min。		[43]
微波加热	鹰嘴豆	植酸	25	室温, 料液比1:10, 浸泡16 h, 微波处理15 min。		[41]
		单宁	26.2			
	黑豆	植酸	26.5	2450 MHz, 30 min。	杂豆外表不受损害, 加热快速, 最大程度消除抗营养因子。	[45]
		胰蛋白酶抑制剂	9.5			
	硬皮豆	植酸	53.8			
		单宁	64.7	过夜浸泡, 料液比1:8, 800 W, 30 min。		[47]
	黑豆	胰蛋白酶抑制剂	79.2			
		皂苷	22.1			
	黑豆	胰蛋白酶抑制剂	15.5	料液比1:10, 浸泡1 h, 射频功率27 MHz, 30 min。		[49]
		皂苷	22.0			
射频加热	黑豆	单宁	17.7	料液比1:10, 浸泡30 min, 27 MHz下处理30 min。	加热速度快, 设备投资较高, 对操作人员的专业性要求高。	[45]
		植酸	27.6			
	鹰嘴豆	胰蛋白酶抑制剂	40.5	水分含量18%, 9 kW 120 °C下处理15 s。		[50]
		胰蛋白酶抑制剂	80.3			
	小黑豆	植酸	14.37			
		胰蛋白酶抑制剂	52.54	180 °C烤箱中处理20 min。		[46]
焙烤	扁豆	单宁	14.46			
		胰蛋白酶抑制剂	23.1	烤箱加热至120 °C, 不断搅拌, 直至褐变。	相比射频加热和高压高温处理, 设备更加常见, 投资低, 生产中较为常用。	[53]
	四棱豆	植酸	60.7			
		胰蛋白酶抑制剂	33.6			
	扁豆	植酸	85.5	室温, 料液比1:10, 过夜浸泡, 90 °C烤箱中加热30 min。		[54]
		单宁	50.0			
挤压膨化	扁豆	胰蛋白酶抑制剂	93.5			
		凝集素	100	20 kg/h进料, 水分含量17%, 挤压温度160 °C。	挤压膨化处理现普遍应用于生产各种杂豆即食食品, 对比其他消除方式, 挤压膨化处理无法保留杂豆原有的形态, 经挤压膨化处理后的杂豆可以直接食用。	[56]
		植酸	19.7			

续表 2

处理方式	杂豆	抗营养因子	消除率(%)	处理参数	优缺点	文献
挤压膨化	芸豆	胰蛋白酶抑制剂	92.1			
		凝集素	99.7			
		植酸	20.7			
	蚕豆	单宁	83.8	385 g/min进料, 水分含量25%, 挤出温度156 °C。	挤压膨化处理现普遍应用于生产各种杂豆即食食品, 对比其他消除方式, 挤压膨化处理无法保留杂豆原有的形态, 经挤压膨化处理后的杂豆可以直接食用。	[57]
		胰蛋白酶抑制剂	98.9			
		凝集素	99.6			
		植酸	26.7			
		单宁	54.4			
	芸豆	植酸	1.89			
		单宁	93.3			
		胰蛋白酶抑制剂	9.62			
		凝集素	0	手工脱皮。		
		植酸	9.68		相比热处理, 脱皮仅能消除存在于种皮中的抗营养因子, 但对其他抗营养因子的消除效果不好。	[57]
		单宁	92.3			
脱皮	蚕豆	胰蛋白酶抑制剂	11.6			
		凝集素	0			
		单宁	28.6	使用机器在低速下10 s内机械脱皮。		[58]
	豌豆	凝集素	0			
		植酸	60.8			
		单宁	60			
发芽	蚕豆	胰蛋白酶抑制剂	25.3			[57]
		凝集素	0	10%氯化汞溶液对蚕豆、芸豆预处理, 蒸馏水冲洗, 转移到有湿滤纸的培养皿中, 在黑暗条件下25 °C萌发72 h。	发芽是一种常见的抑制抗营养因子的方法, 操作简单, 对环境要求不高, 可以有效抑制抗营养因子; 对比热处理, 发芽会改变杂豆原有形态形成豆芽, 不适用需要使用原豆为原料的食品。	
		植酸	30.2			
		单宁	71.6			
		胰蛋白酶抑制剂	29			
	芸豆	凝集素	0			
		胰蛋白酶抑制剂	19.39	料液比1:10, 室温过夜浸泡, 于湿滤纸的培养皿中室温放置5 d。		[54]
		植酸	48.94			
		单宁	57			
		胰蛋白酶抑制剂	64	发酵温度32 °C; 发酵时间18 h。		[59]
发酵	缘豆	凝集素	50			
		植酸	70			
		单宁	67.5			
		胰蛋白酶抑制剂	70			
	豌豆	植酸	41.5	将干活性酵母溶解在温蒸馏水中, 加入种子中, 在室温下继续发酵24 h。	发酵的底物可以是原豆、研磨产品或加工产品, 在发酵过程中不仅能产生多种活性物质, 还能提高消化率和微量营养素的利用率并减少抗营养因子。	[37]
		单宁	68.9			
		胰蛋白酶抑制剂	92.6			
		植酸	84.1			
	芸豆	单宁	42.8			
		胰蛋白酶抑制剂				

3 结论

目前抗营养因子的检测方法已经非常成熟, 能够高效、快速地对杂豆中的抗营养因子进行检测, 一些传统检测方法操作简便, 成本低但灵敏度不高, 采用精密仪器的检测方法会大大提高检测的灵敏度和准确度, 但操作过程复杂, 成本高。目前已有通过抗营养因子与大分子抗体配对, 采用胶体金免疫层析试纸条检测主要抗营养因子的方法, 实现了杂豆抗营养因子的实时、快速检测, 但存在着测定结果还不够稳定, 其准确性依赖抗体的特异性, 定量不准确等问题。还需进一步探索出具有更高检测能力、可靠性、适用性和经济性的方法。

对于热处理来消除抗营养因子的方法, 发现个别非热敏性抗营养因子在进行加热后含量并不会显

著下降, 同一加热方式对于不同种类的杂豆中抗营养因子消除率不同。与其他方法相比加热处理无化学残留安全性更高, 操作简便, 使用的设备更常见, 设备成本低, 基本不破坏杂豆中的蛋白质、膳食纤维、淀粉及脂肪, 但会破坏杂豆中的维生素 C 及 B 族维生素。未来可以将热处理与工艺、其他处理方式相结合, 在满足工艺需要的同时, 调整热处理参数, 最大程度地提高抗营养因子的消除率、减少营养物质的损失。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 张婷, 袁艺, 王鑫, 等. 杂豆分类、营养功效及其产品开发的研究

- 究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 428–437. [ZHANG T, YUAN Y, WANG X, et al. A review on classification, nutritional benefits of pulses and the products development[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 428–437.]
- [2] 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. Effects and regulations of common processing methods on pulse quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(1): 177–185.]
- [3] 杜亚军, 李红梅, 李云龙. 杂豆主食化研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 183–188. [DU Y J, LI H M, LI Y L. Research status on pulses for staple food[J]. Journal of Food Research and Development, 2021, 42(11): 183–188.]
- [4] 沙如意, 崔艳丽, 王少林, 等. 植酸/植酸钠在食品工业上的应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 293–309. [SHA R Y, CU Y L, WANG S L, et al. Application advances of phytic acid/sodium phytate in food industry[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(6): 293–309.]
- [5] 袁长梅, 贺晓云, 马丽艳, 等. 植酸及其检测方法研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 396–400. [YUAN C M, HE X Y, MA L Y, et al. Research progress of phytic acid and its detection methods[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 396–400.]
- [6] BROUNS F. Phytic acid and whole grains for health controversy[J]. Nutrients, 2021, 14(1): 25.
- [7] WANG R, GUO S. Phytic acid and its interactions: Contributions to protein functionality, food processing, and safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 2081–2105.
- [8] FEIZOLLAHI E, MIRMAHDI R S, ZOGHI A, et al. Review of the beneficial and anti-nutritional qualities of phytic acid, and procedures for removing it from food products[J]. Food Research International, 2021, 143: 110284.
- [9] ROMERO-AGUILERA F, ALONSO-ESTEBAN J I, TORIJA-ISASA M E, et al. Improvement and validation of phytate determination in edible seeds and derived products, as mineral complexing activity[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(10): 3285–3291.
- [10] 武雪芬, 王宪龄, 袁秀荣, 等. 比色法与HPLC法测定植酸含量结果比较[J]. 河南科技, 1994(7): 24–25. [WU X F, WANG X L, YUAN X R, et al. Comparison of results between colorimetric and HPLC methods for determining phytic acid content[J]. Henan Science and Technology, 1994(7): 24–25.]
- [11] CHAI S Q, HE J H, ZHAN L, et al. Dy (III)-induced aggregation emission quenching effect of single-layered graphene quantum dots for selective detection of phosphate in the artificial wetlands[J]. Talanta, 2019, 196: 100–108.
- [12] GE S, HE J, MA C, et al. One-step synthesis of boron-doped graphene quantum dots for fluorescent sensors and biosensor[J]. Talanta, 2019, 199: 581–589.
- [13] CENTENO L, ROMERO-GARCIA J, ALVARADO-CANCHE C, et al. Green synthesis of graphene quantum dots from *Opuntia* sp. extract and their application in phytic acid detection[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2021, 32: 100412.
- [14] 齐伟杰. 现代近红外光谱分析在食品检测中的应用[J]. 中国食品, 2021(16): 124–125. [QI W J. Application of modern near infrared spectroscopy in food detection[J]. China Food, 2021(16): 124–125.]
- [15] CHEN Q C. Determination of phytic acid and inositol pentakisphosphates in foods by high-performance ion chromatography[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2004, 52: 4604–4613.
- [16] HELFRICH A, BETTMER J. Determination of phytic acid and its degradation products by ion-pair chromatography (IPC) coupled to inductively coupled plasma-sector field-mass spectrometry (ICP-SF-MS)[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2004, 19(10): 1330–1334.
- [17] LE BOT M, THIBAUIL J, POTTIER Q, et al. An accurate, cost-effective and simple colorimetric method for the quantification of total triterpenoid and steroid saponins from plant materials[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132597.
- [18] FLECK J D, BETTI A H, DA SILVA F P, et al. Saponins from *Quillaja saponaria* and *Quillaja brasiliensis*: Particular chemical characteristics and biological activities[J]. Molecules, 2019, 24(1): 171.
- [19] ALI H, HOUGHTON P J, SOUMYANATH A. α -Amylase inhibitory activity of some Malaysian plants used to treat diabetes; with particular reference to *Phyllanthus amarus*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2006, 107(3): 449–455.
- [20] 韩君. 白扁豆总皂苷的含量测定与成分分析[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(8): 195–198. [HAN J. Content determination and composition analysis of total saponins in Lablab Semen Albums[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 195–198.]
- [21] 陈钰泉, 刘玉婷, 邱杰, 等. 不同比色法测定植物源总三萜皂苷含量的对比[J]. 黑龙江农业科学, 2018(3): 108–112. [CHEN Y Q, LIU Y T, QIU J, et al. Comparation of different colorimetry for determination of the total herbal triterpenoid saponins[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(3): 108–112.]
- [22] 吴敏, 俞闻, 袁建, 等. 酶标仪分光光度法定量测定鹰嘴豆总皂苷[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 143–149. [WU M, YU T, YUAN J, et al. Quantitative determination of total saponins in chickpea by spectrophotometer with microplate reader[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(5): 143–149.]
- [23] SAGRATINI G, ZUO Y, CAPRIOLI G, et al. Quantification of soyasaponins I and β g in Italian lentil seeds by solid-phase extraction (SPE) and high-performance liquid chromatography-mass spectrometry (HPLC-MS)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(23): 11226–11233.
- [24] HA T J, LEE B W, PARK K H, et al. Rapid characterisation and comparison of saponin profiles in the seeds of Korean leguminous species using ultra performance liquid chromatography with photodiode array detector and electrospray ionisation/mass spectrometry (UPLC-PDA-ESI/MS) analysis[J]. Food Chemistry, 2014, 146: 270–277.
- [25] 徐重新, 谢雅晶, 何鑫, 等. 凝集素在农业和食品领域中的应用研究进展[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1135–1144. [XU C X, XIE Y J, HE X, et al. Research progress of the application of lectin in agriculture and food[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2022, 38(4): 1135–1144.]
- [26] KONG X, LI Y, LIU X. A review of thermosensitive antinutritional factors in plant-based foods[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(9): e14199.
- [27] VOJDANI A, AFAR D, VOJDANI E. Reaction of lectin-specific antibody with human tissue: Possible contributions to autoimmunity[J]. Journal of Immunology Research, 2020, 2020: 16.
- [28] CHEN N, ZHENG S. Application research of protein test by using biuret reagent[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2014, 38(6): 458–460.
- [29] 王秀钧. 小扁豆凝集素的双缩脲法测定[J]. 第二军医大学学报, 1986(6): 446–448. [WANG X J. Determination of lentil agglutinin by biuret method[J]. Academic Journal of Naval Medical University, 1986(6): 446–448.]
- [30] 王超. 豆类凝集素的提取分离及纯化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨

- 工业大学, 2013: 10–11. [WANG C. Extraction, isolation and purification of legume lectin[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2013: 10–11.]
- [31] 戴大章, 陈妙月, 叶均安, 等. 血凝法测定饲料中植物凝集素含量[J]. 中国兽医学报, 2005(4): 438–440. [DAI D Z, CHEN M Y, YE J A, et al. Quantification of lectins in feed by hemagglutination[J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2005(4): 438–440.]
- [32] 陈婧宜, 王洪新. 刀豆凝集素的血凝活性及其性质研究[J]. 安徽农业科学, 2008(1): 80–82, 88. [CHEN J Y, WANG H X. Study on Determination of hegglutination activity of the lectin from *Canavalia ensiformis* (L.) DC and its characteristics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008(1): 80–82, 88.]
- [33] NORGAARD J V, MALLA N, DIONISIO G, et al. Exogenous xylanase or protease for pigs fed barley cultivars with high or low enzyme inhibitors[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 248: 59–66.
- [34] LIU K. Trypsin inhibitor assay: Expressing, calculating, and standardizing inhibitor activity in absolute amounts of trypsin inhibited or trypsin inhibitors[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2021, 98(4): 355–373.
- [35] LIU K, SEEGERS S, CAO W, et al. An international collaborative study on trypsin inhibitor assay for legumes, cereals, and related products[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2021, 98(4): 375–390.
- [36] SHARAMA A. A review on traditional technology and safety challenges with regard to antinutrients in legume foods[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(8): 2863–2883.
- [37] KHATTAB R Y, ARNTFIELD S D. Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments 2. Antinutritional factors[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(6): 1113–1118.
- [38] HEFNAWY T H. Effect of processing methods on nutritional composition and anti-nutritional factors in lentils[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2011, 56(2): 57–61.
- [39] 高晗. 高压食品技术的发展及应用[J]. 现代食品, 2023, 29(4): 25–27. [GAO H. Development and application of high-pressure food technology[J]. Modern Food, 2023, 29(4): 25–27.]
- [40] REHMAN Z, SHAH W H. Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes[J]. *Food Chemistry*, 2005, 91(2): 327–331.
- [41] XU Y, CARTIER A, OBLELODAN M, et al. Nutritional and anti-nutritional composition, and *in vitro* protein digestibility of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by differential processing methods[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2016, 10(3): 625–633.
- [42] 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.
- [43] SHI J, XUE S J, MA Y, et al. Kinetic study of saponins B stability in navy beans under different processing conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(1): 59–65.
- [44] SUHAG R, DHIMAN A, DESWAL G, et al. Microwave processing: A way to reduce the anti-nutritional factors (ANFs) in food grains[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111960.
- [45] ZHONG Y, WANG Z, ZHAO Y. Impact of radio frequency, microwaving, and high hydrostatic pressure at elevated temperature on the nutritional and antinutritional components in black soybean[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(12): C2732–C2739.
- [46] YANG H W, HUS C K, YANG Y F. Effect of thermal treatments on anti-nutritional factors and antioxidant capabilities in yellow soybeans and green-cotyledon small black soybeans[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(9): 1794–1801.
- [47] VASHISHTH R, SEMWAL A D, NAIKA M, et al. Influence of cooking methods on antinutritional factors, oligosaccharides and protein quality of underutilized legume *Macrotyloma uniflorum* [J]. *Food Research International*, 2021, 143: 110299.
- [48] 胡晓亮, 曹素璋, 李伟强, 等. 射频加热技术在食品加工中的应用[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 415–419. [HU X L, CAO S Z, LI W Q, et al. Application of radio frequency heating technology in food processing[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 415–419.]
- [49] 王竹怡. 黑豆介电特性及射频加热对其品质的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 35. [WANG Z Y. Dielectric properties of black beans and impact of radio frequency heating on qualities of black bean[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 35.]
- [50] ADEDAYO O, JANITHA W, OON D B. Effect of radio frequency heating on anti-nutritional factors and negative flavours in red lentil and kabuli chickpea[C]. 5th CIGR International Conference and CSBE-SCGAB AGM 2021, 2021.
- [51] 王楠, 侯旭杰. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 209–215. [WANG N, HOU X J. Application of new heating technology and its research progress[J]. Food Research and Development, 2019, 40(4): 209–215.]
- [52] 王科瑜, 杨宏旭, 王超英, 等. 烘烤、蒸煮和微波加热技术在动物源性食品加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 325–330. [WANG K Y, YANG H X, WANG C Y, et al. Application of baking, boiling, microwaving heating techniques in animal-derived food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 325–330.]
- [53] OSMAN M A. Effect of different processing methods, on nutrient composition, antinutritional factors, and *in vitro* protein digestibility of Dolichos lablab bean [*Lablab purpureus* (L) sweet] [J]. *Pakistan Journal of Nutrition* 2007, 6(4): 299–303.
- [54] MUGABO E, AFOAKWA E O, ANNOR G, et al. Effect of pretreatments and processing conditions on anti-nutritional factors in climbing bean flours[J]. *International Journal of Food Studies*, 2017, 6(1): 221–224.
- [55] 徐微, 张丝璐, 贾健辉, 等. 我国焙烤食品的现状与发展趋势[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 7–9. [XU W, ZHANG S Y, JIA J H, et al. Current situation and development trend of bakery products in China[J]. Cereals and Oils, 2020, 33(7): 7–9.]
- [56] CIUDAD-MULERO M, FERN NDEZ-RUIZ V, CUADRADO C, et al. Novel gluten-free formulations from lentil flours and nutritional yeast: Evaluation of extrusion effect on phytochemicals and non-nutritional factors[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 1–7.
- [57] ALONSO R, AGUIRRE A, MARAO F. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch in faba and kidney beans[J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(2): 159–165.
- [58] ALONSO R, ORUE E, MARZO F. Effects of extrusion and conventional processing methods on protein and antinutritional factor contents in pea seeds[J]. *Food Chemistry*, 1998, 63(4): 505–512.
- [59] SHARMA A, KUMARI S, NOUT M J R, et al. Preparation of antinutrients-reduced dhokla using response surface process optimization[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55: 2048–2058.