芸豆中的大分子功能组分及其应用研究进展

孔春丽， 段彩苹， 芦 晶， 周素梅*
（北京工商大学 食品与健康学院，北京 100048）

摘要： 芸豆是我国重要的豆类作物，是一种兼具食用和药用价值的植物基资源。芸豆蛋白质属于全价蛋白，且富含具有降糖和免疫活性的功能糖蛋白组分，芸豆同时含有丰富的多糖类物质，具有调节肠道生理功能等作用。近年来，以芸豆为基础的减肥食品备受关注，植物基膳食模式的兴起，引起了国内外学者对芸豆这一宝贵豆类资源展开深入研究。作者就不同品种芸豆的大分子组分的结构特性、物质组成、生理功能、加工特性等展开了介绍，同时对芸豆大分子间的相互作用及功能特性进行了概述，旨在为芸豆大分子的健康调控机制研究提供理论基础，为新型营养健康食品开发提供参考。

关键词： 芸豆；蛋白质；多糖；生理功能；食品加工
中图分类号：TS 214.9 **文章编号：**1673-1689(2022)12-0008-11 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.12.002

Research Progress on Functional Macromolecules of Kidney Beans and Their Applications

KONG Chunli， *DUAN Caiping*， *LU Jing*， *ZHOU Sumei**
（School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China）

Abstract: Kidney bean is an important legume in China and is also plant-based resource with highly edible and medicinal value. Kidney bean proteins are complete proteins, which are rich in functional glycoprotein with hypoglycemic or immune activity. Kidney bean also contains abundant polysaccharides with intestinal physiological regulation and other functions. In recent years, the development of kidney bean-based diet foods has attracted much attention, and the rise of plant-based diet style has aroused intensive researches on this valuable bean resource conducted by domestic and foreign scholars. The structural characteristics, substance compositions, physiological functions and processing properties of macromolecular components in the different varieties of kidney beans were introduced. The interactions and functional characteristics of macromolecules in kidney beans were also summarized to provide the theoretical basis for the study of health regulatory mechanism of kidney bean macromolecules and to provide references for the development of novel nutritional and healthy foods.

Keywords: kidney bean, proteins, polysaccharides, physiological functions, food processing

收稿日期： 2022-09-19
基金项目： 国家自然科学基金项目(32201954)；国家重点研发计划项目(2021YFD1600604)；财政部和农业农村部-国家现代农业产业技术体系项目(CARS-08)；北京工商大学青年教师科研启动基金资助项目(QNJJ2022-12)。
* **通信作者：** 周素梅(1971—)，女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事新型谷物营养健康食品方面的研究。
E-mail：zhousumei1001@163.com

芸豆,豆科菜豆属,学名菜豆(*Phaseolus vulgaris* Linn.sp),在世界范围内是一种重要的食用豆类作物,分布广、品种多,种植面积仅次于大豆[1]。芸豆的常见品种有普通菜豆(*Phaseolus vulgaris* L.)、多花菜豆(*Phaseolus coccineus* L.)。以外观区别,有白芸豆、红芸豆、黑芸豆、花芸豆等。近年来,随着消费者健康和环保意识的不断提升,植物基膳食模式备受推崇,芸豆因富含优质蛋白质、膳食纤维、功能性植物化学物质且易于加工的特性,具有较高的食用、加工和经济价值[2]。大量研究表明,芸豆及其所含组分有调节肠道健康、降血糖、降血脂、抑制癌症等功效,但多集中于对芸豆抗营养因子 α-淀粉酶抑制剂(α-amylase inhibitor,α-AI)和植物凝集素(phytohemagglutinin,PHA)功效及加工改性的探究,对蛋白质和碳水化合物组分加工特性、生物活性及作用机理的探索仍处于起步阶段,以芸豆为主的产品类型偏少[3-4]。作者就不同品种芸豆中有关主要大分子营养组分(蛋白质、淀粉、非淀粉多糖)的组成、结构、功能活性、加工特性等的国内外研究进展进行梳理、总结,以期为芸豆在新型营养健康食品开发中的应用提供支撑。

1 芸豆中蛋白质类物质

1.1 贮藏蛋白

芸豆是优质的植物蛋白质来源,蛋白质质量分数为 20%~30%(以干基质量计),其中可提取蛋白质超过 95%为贮藏蛋白。根据在不同溶剂中溶解性的差异,芸豆贮藏蛋白主要有盐溶性球蛋白、水溶性清蛋白、醇溶性谷蛋白和稀碱/酸溶性麦谷蛋白。各蛋白质组分的质量分数主要取决于芸豆品种和提取工艺(见表 1)。有研究者指出黑芸豆蛋白质以球蛋白为主,质量分数约 50%[5]。也有研究中提取的芸豆球蛋白质量分数只有 21%[2]。韩晶在对 6 种芸豆中蛋白质组分分析时发现清蛋白质量分数最高,为 65.79%~72.98%,球蛋白次之,为 9.81%~14.93%,醇溶蛋白可达 5.78%~7.88%,谷蛋白为 6.70%~8.67%[6]。陈晓萌分析了英国大红芸豆和山西小红芸豆蛋白质组分,也得出芸豆蛋白质以清蛋白为主,球蛋白次之,同时发现提取温度等工艺条件也会影响红芸豆清蛋白的得率[7]。

表 1 芸豆中蛋白质组分研究进展

Table 1 Research progress on protein components in kidney beans

芸豆品种	功能组分	提取方式	组分质量分数、生物活性等特征	来源
P.vulgaris L. var Jamapa	球蛋白	40 ℃,30 min	50%	中美洲[5]
P. vulgaris	球蛋白	4 ℃,1 h	21%	墨西哥[2]
紫花、西班牙白、英国红、日本红、En 和白沙克芸豆	清蛋白 球蛋白	室温,3 h,浸提 3 次	65.79%~72.98% 9.81%~14.93%	黑龙江[6]
英国大红芸豆 山西小红芸豆	清蛋白 球蛋白	45 ℃,3 h	74.08%、10.08%	山西[7]
		65 ℃,3 h	66.50%、13.05%	
白芸豆	α-AI	水提法,80 目,55 ℃,8 h	抑制率 76%	市售[17]
白芸豆	α-AI	水提法结合盐析和超滤	抑制率 85.74%	市售[16]
花芸豆	α-AI	60 目,室温,pH 6.4,2 h	抑制率 85.89%	市售[4]
红芸豆	PHA	硫酸铵分级沉淀法	pH 7、40 ℃时,凝血活性最高	市售[23]
黑芸豆	PHA	反向胶束萃取法	pH 1.0、33.8 ℃、加热 15 min 时,芸豆凝集素结合能力最低	市售[21]

芸豆必需氨基酸组成符合 FAO(联合国粮食及农业组织)和 WHO(世界卫生组织)提出的标准蛋白质模式,且氨基酸评分(AAI)、必需氨基酸指数(EAAI)、营养指数(NI)等指标均高于乳清蛋白和大豆蛋白,具有很高的营养价值。郭增旺等发现白芸豆、红芸豆、黑芸豆和紫花芸豆蛋白质为全价蛋白,所含必需氨基酸均显著优于大豆蛋白[8]。訾艳等指出白芸豆球蛋白中必需氨基酸(EAA)和总氨基酸(TAA)比值为 0.403 7,和 FAO 及 WHO 的推荐值 0.40 接近,同时,SDS-PAGE 结果显示,白芸豆球蛋白图谱共有 6 条蛋白质亚基条带,相对分子质量分别为 21.99×10^3、26.28×10^3、29.62×10^3、33.84×10^3、47.35×10^3、97.52×10^3[9]。另有研究指出芸豆球蛋白以 7S 芸豆素为主,二级结构主要有 β-折叠和不规则卷曲,由 α-、β-、γ-多肽亚基组成,相对分子质量介于 4.3×10^4~5.3×10^4,其相对分子质量取决于亚基和

糖分子的接枝度[10]。然而,芸豆蛋白的抗消化特性抑制了其营养价值的发挥,比如芸豆球蛋白的体外水解和体内消化率仅为 28%~36%,这可能是各蛋白质组分和多糖结合造成的,但是经过合适的加工,比如热处理可以改变球蛋白的三级和四级结构,极大提升消化率至 80%~90%[11]。近年来,越来越多的研究关注于优化芸豆蛋白质的提纯及改性技术,以提升芸豆蛋白质的加工特性和生物活性,将在后文归纳。

1.2 特殊功能性蛋白质

α-AI 是芸豆中已知具有降糖活性的功能蛋白,通过抑制淀粉酶活性,阻碍碳水化合物的消化和吸收,从而降低餐后血糖水平[3]。芸豆 α-AI 本质是一种糖蛋白,由蛋白质和糖链结合而成。目前报道的芸豆 α-AI 共有 3 种亚型:α-AI1、α-AI2 和 α-AI3,其中,α-AI1 是一种二聚体糖蛋白,具有四级结构,对人源性淀粉酶具有抑制活性[12]。Yang 等从白芸豆中分离纯化出 α-AI,相对分子质量 3.6×10^4,蛋白质质量分数 88.2%,糖链质量分数 12.8%,两者通过 O-糖肽键连接,同时发现,只有蛋白质和糖链结合在一起才具有生物活性,单独的蛋白质和糖链对猪源淀粉酶均不具有抑制活性[13]。α-AI 的作用机制目前仍存在争议,但更多研究指向芸豆 α-AI 通过与淀粉酶活性中心键合形成酶-抑制剂复合物,从而使酶失活,属于非竞争性抑制,键合作用主要有氢键相互作用、疏水相互作用、催化残基和酶的相互作用等[14]。

影响 α-AI 活力的因素很多,比如芸豆中酚类物质、PHA 和胰蛋白酶抑制剂(TI)均会降低 α-AI 的生物活性和安全性[15],其他因素包括芸豆品种、提取温度、pH、孵育时间和特定离子的存在等也会影响 α-AI 的活力,最大程度地保留芸豆 α-AI 的活力已成为当下的研究热点[4,12,16]。迟永楠等采用水提法制备白芸豆 α-AI,发现白芸豆粉 80 目,55 ℃提取 8 h,α-AI 的提取率最高可达 4.67%,抑制率最高为 76%[17]。姜彩霞等亦是采用了水提法,结合盐析和超滤制备白芸豆 α-AI,虽然得率仅为 3.47%,但是酶活在 pH 为 2~10 具有广谱稳定性,抑制率最高达 85.74%[16]。汪云吉对比了产自内蒙古自治区的 5 种芸豆粗提物中 α-AI 的活性,发现花芸豆对淀粉酶的抑制活力最高,得到的优化条件为 60 目,pH 6.4,室温提取 2 h,抑制率最高达 85.89%,PHA 的凝集活力降至 6.97%,添加酸性酶可完全去除 PHA,抑制率仍可保持较高活力,为 75.38%[4]。让一峰等对比了超高压、热处理、酸碱处理和超滤对白芸豆 α-AI 和 TI 活性的影响,Millipore 超滤系统(截留相对分子质量 3×10^4)对 α-AI 的截留率达 98.32%,而对 TI 的截留率仅为 27.20%[15]。

PHA 是一种广泛存在于植物细胞表面的糖蛋白,能够特异性识别单糖或多糖结构,具有抗病毒等功效。芸豆 PHA 被认为是一类抗营养因子[18],有 4 个糖基结合位点,通常由两种相对分子质量约 3×10^4 的亚基组成四聚体蛋白[19],大多为籽粒成熟或萌发过程中的贮藏蛋白,质量分数约 1%[20]。Sun 等发现黑芸豆 PHA 的相对分子质量为 3.1×10^4[21]。于雪慧等采用硫酸铵分级沉淀、Sephadex G-50 和 DEAE-A50 阴离子交换层析纯化后得到新疆花芸豆 PHA,相对分子质量约为 3.2×10^4[22]。芸豆 PHA 的生物活性受温度、pH 等因素影响较大,Dongre 等发现随着温度、pH 升高,红芸豆 PHA 活力呈先增加后降低的趋势,当 pH 为 7,温度为 40 ℃时,凝血活性最高[23]。Sun 等采用响应面法研究了 pH 和热处理对黑芸豆 PHA 的影响,发现当 pH 为 1.0,33.8 ℃加热 15 min 时,芸豆凝集素结合能力最低[21]。

2 芸豆中糖类物质

2.1 芸豆淀粉

芸豆淀粉质量分数为 30%~50%,是籽粒中最多的组分,以直链淀粉为主,质量分数最高可达 30%~65%,支链淀粉次之,同时含有质量分数 9.16%~18.09%的抗性淀粉[24](见表 2)。淀粉结晶型多为 C 型结构,是 A 型和 B 型两种结晶型的叠加,属于限制性膨胀淀粉,相比于谷物淀粉,芸豆淀粉具有热/冷糊稳定性强、回生率高、抗剪切力强、抗酶解性强等特性,因此消化率低,可以降低餐后血糖水平[25-27]。

通常采用预熟化工艺处理芸豆,使淀粉发生改性,与谷物达到同煮同熟。王婷发现经预熟化处理后,白芸豆、黑芸豆和紫花芸豆可与大米同煮同熟,硬度和咀嚼性均得到改善[28]。未经预熟化处理的芸豆淀粉颗粒表面光滑,预熟化处理后,颗粒表面和中心均受到破坏,其中,紫花芸豆和黑芸豆中直链淀粉降低,白芸豆则与之相反,但 3 种芸豆淀粉酶解力均增加,消化性增强。由此可见芸豆品种筛选

表 2 芸豆中淀粉组分研究

Table 2 Research on starch components in kidney beans

芸豆品种	功能组分	提取方式	组分质量分数、加工特性等特征	来源
26 种芸豆	抗性淀粉	100 ℃油浴,2 mol/L H_2SO_4 水解 2 h	9.16%~18.09%	市售[24]
白芸豆	淀粉	碱法提取	易成糊、抗剪切	未知[25]
紫花芸豆	淀粉	50 ℃浸泡 30 min,50 kPa 低压蒸煮 5 min	淀粉颗粒偏光十字消失,A 型,直链淀粉质量分数降低,抗性淀粉质量分数增加	市售[28]
黑芸豆		50 ℃浸泡 30 min,1 600 W,微波蒸煮 6 min,80 ℃热风干燥 1.5 h,600 W 微波干燥 3 min	淀粉颗粒偏光十字消失,A 型,直链淀粉质量分数降低,抗性淀粉质量分数降低,化学键组成不变	
白芸豆		50 ℃浸泡 40 min,121 ℃高压水煮 15 min,60 ℃热风干燥	淀粉颗粒偏光十字消失,A 型,直链淀粉质量分数增加,抗性淀粉质量分数降低,化学键组成不变	
白芸豆	淀粉	湿热处理:芸豆粉含水量调至 30%(质量分数),室温平衡 24 h,120 ℃烘箱加热 2 h,40 ℃烘箱加热 12 h	直链淀粉质量分数增加,C 型转为 A 型,膨润力和溶解度降低,热稳定性和剪切稳定性增强	市售[29]
		多菌发酵:马克斯克鲁维酵母和植物乳杆菌或戊糖片球菌	直链淀粉质量分数增加,C 型转为 A 型,膨润力和溶解度降低,热稳定性和剪切稳定性增强	

对生产工艺优化的重要性。不同的前处理工艺对芸豆淀粉含量也会产生一定影响,生的白芸豆酸面团中抗性淀粉为 16.51%,经湿热处理升至 19.54%,经微生物发酵升至 21.55%(均为质量分数),而湿热-微生物发酵组合处理,抗性淀粉质量分数最高达 23.40%。推测可能是湿热和微生物发酵均使支链淀粉分子发生断裂,直链淀粉质量分数升高,降温过程中,通过氢键连接生成了大量抗性淀粉[29]。

2.2 芸豆中的非淀粉多糖组分

非淀粉多糖是植物淀粉以外大部分多糖的总称,是不易被人体消化酶降解的膳食纤维组分。比如,张雅芝采用酶法结合缓冲液提取了白芸豆非淀粉多糖,质量分数为 45.63%,同时含有质量分数 17.53%的糖醛酸,推测其是一种果胶类多糖[30]。芸豆非淀粉多糖主要存在于细胞壁中,不同于大豆和鹰嘴豆等豆类的非淀粉多糖以水溶性膳食纤维(SDF)为主,芸豆非淀粉多糖主要以水不溶性膳食纤维(IDF)为主[31](见表 3)。芸豆 IDF 质量分数约 20%,而 SDF 质量分数仅约 3%[32]。相较于 SDF,IDF 对葡萄糖的吸附作用更高,这可能也是芸豆具有降糖、减脂活性的主要原因。

不同的提取、纯化方式对芸豆非淀粉多糖的得率和精细结构会产生很大影响。研究发现超声提取法的各项参数(超声频率、温度和时间)均会影响芸豆 IDF 和 SDF 的产量,而超声辅助酶法比单一的超声法或酶法提取均会增加 IDF 得率[31]。Yi 等采用水提法和螯合剂提取的种皮多糖成分以 GalA 为主,而采用 Na_2CO_3 提取则以 Xyl 为主[33]。在对芸豆膳食纤维精细结构研究中发现,强阴离子交换色谱所得红芸豆多糖以 HG 型果胶和阿拉伯聚糖为主,含有少量的 XGA 型果胶,单糖组成主要有 Ara、Xyl、GalA、Gal、Fuc 和 Rha,以 Ara 质量分数(20.82%)最高;而凝胶渗透色谱纯化所得多糖以 AG-II 型果胶为主,同时含有少量 RG-II 型果胶[34]。然而白芸豆非淀粉多糖是以 α 型果胶为主的杂多糖,含有 8 种单糖,分别为 Rha、Ara、Gal、Glc、Xyl、Man、GalA 和 GlcA,也是以 Ara 质量分数(36.54%)最高[30]。Tang 等采用葡聚糖凝胶柱层析法对白芸豆酸性多糖分离纯化,得到不同相对分子质量分布的 5 个组分(P1~P5),其中,P2 以 HG 型果胶为主,含有少量 RG-I 和 XGA 果胶,单糖组成以 GalA 为主(质量分数 26.37%),而 P3 以 XGA 型果胶为主,同时含有一定量 HG 和 RG-I,P4 以 RG-I 型果胶为主,单糖组分 Ara 质量分数(51.3%)最高[35]。

3 芸豆中大分子组分的生理活性

3.1 阻断糖分子释放

超重、肥胖和糖尿病是目前全球最主要的健康问题,且呈年轻化趋势,2021 年 WHO 统计数据显示,5~19 岁青少年肥胖人口数高达 3.4 亿[36]。芸豆和以 α-AI 为主要成分的芸豆提取物可以降低餐后血糖水平和胰岛素应答,具有良好的降脂减肥效果,因而备受社会关注。Spadafranca 等招募了 12 位健康青年志愿者(20~26 岁),发现膳食添加芸豆提取

表 3　芸豆中非淀粉多糖组分研究

Table 3　Research on non-starch polysaccharides in kidney beans

芸豆品种	功能组分	提取方式	组分质量分数、组成等特征	来源
奶白花芸豆	非淀粉多糖	超声辅助复合酶法提取:60 ℃,超声强度 250 W,25 min	不溶性膳食纤维 60.11%,可溶性膳食纤维 5.63%	未知[31]
P.vulgaris L. cv. IAC carioca Eté	非淀粉多糖	浸泡 16 h,常压蒸煮 20 min	不溶性膳食纤维 20%,可溶性膳食纤维 3%	巴西[32]
白芸豆	非淀粉多糖	醇沉法	以 α 果胶为主,单糖组成以 Ara 为主,为 36.54%	山西[30]
P.vulgaris c.v. Rose coco	非淀粉多糖	水提法、螯合剂提取法、Na_2CO_3 提取	单糖组成以 GalA 和 Xyl 为主	肯尼亚[33]
红芸豆	可溶性多糖	醇沉法	强阴离子交换色谱纯化,多糖以 HG 型果胶和阿拉伯糖为主;凝胶渗透色谱纯化,多糖以 AG-II 型果胶为主	山西[34]
白芸豆	果胶多糖	醇沉法	葡聚糖凝胶层析法分离纯化:P2 以 HG 型果胶为主,含有少量 RG-I 和 XGA,P3 以 XGA 型果胶为主,P4 以 RG-I 型果胶为主,单糖组成以 Ara 为主,为 51.3%	市售[35]

物,可以抑制胃饥饿素分泌,增加饱腹感,降低食欲,同时降低餐后血糖水平[37](见表 4)。张雪苍等采用白芸豆提取物和马齿苋提取物进行复配,加工成低 GI 餐前控糖片,观察到中高剂量摄入可以显著抑制糖尿病小鼠的餐后血糖水平[38]。研究表明,芸豆提取物中降糖功能成分主要是 α-AI,又称淀粉阻断剂或碳水化合物阻断剂。通常情况下,相较于超重患者,健康个体淀粉酶的活性偏高,α-AI 对淀粉酶的抑制活性也会更有效[39]。然而,Qin 等采用白芸豆提取物直接给健康大鼠灌胃,大鼠的器官质量、摄食量和血生化指标均没有发生变化[40]。由此可以推测,芸豆提取物或 α-AI 可能需要和其他膳食组分合理搭配、协同作用。此外,α-AI 的同分异构体中,只有 α-AI1 对人源淀粉酶有抑制效果[41],具有一定的临床测试和市场开发潜力,具体的精细结构与调控机制仍需要进一步探索。

3.2　降血脂

高脂血症是诱发心脑血管疾病,如动脉粥样硬化和中风等的重要因素,降低血液中甘油三酯和总胆固醇含量是改善高脂血症的重要途径。研究表明,芸豆可以有效改善因血脂异常导致的肝脏和肠道屏障功能的下降,主要是通过对胆盐的滞留,阻止其重吸收,从而降低血液中胆固醇水平[42-43](见表 4)。Lin 等采用体外消化模型结合透析分析了芸豆各营养组分对胆盐的滞留能力,发现可溶性膳食纤维可以滞留大部分胆盐,可能归因于消化液黏度的增加,然而,蛋白质虽然没有影响消化液的黏度,但是表现出了对胆盐的最高滞留能力,这可能归因于蛋白质水解物与胆盐分子间的相互作用,其中,甘氨鹅脱氧胆酸钠是主要受影响的胆酸盐[43]。此外,芸豆抗性淀粉也具有一定的降血脂功效,采用紫花芸豆抗性淀粉给高血脂大鼠灌胃可以显著降低血脂水平、体质量,升高血清谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶活力,实验结果和阳性对照组一致[44]。Zuo 等以高脂血症大鼠为模型,发现抗性淀粉对由高脂血症导致的急性胰腺炎具有明显改善作用[42]。主要表现为缓解肠道炎症、抑制氧化应激以及预防肠道屏障的破坏,其中血清细胞因子 IL-6、IL-1β 和 TNF-α 下降,而细胞间紧密连接蛋白基因 *ZO-1*、*Occludin* 以及抗菌肽基因 *CRAMP*、*DEFB1* 增加,小肠绒毛高度以及黏膜层厚度也有所增加,隐窝深度降低。以上研究表明芸豆营养组分的分子组成及理化特性等因素对于评估芸豆营养组分及整个食品体系的重要性。

3.3　肠道益生活性

人体肠道宿有数以万亿计肠道菌体细胞,以厚壁菌门、拟杆菌门、放线杆菌门和变形菌门为主,肠道菌群失衡是导致肠道疾病及多种慢性疾病发生和发展的重要原因。流行病学研究显示膳食摄入芸豆可有效改善肠道菌群结构、增强肠壁屏障功能、抑制炎症、减少肥胖症等疾病的发生。Monk 等研究发现膳食添加质量分数 15.7%的芸豆全粉可以通过改善小鼠肠道菌群缓解肥胖症状[45](见表 4),其中,通常因肥胖而降低的艾克曼菌(*Akkermansia muciniphila*)增加尤为显著,可达 19 倍,和碳水化合物发酵相关的普氏菌属(*Prevotella*)丰度也显著增

表 4 芸豆大分子组分生理功能

Table 4 Physiological functions of macromolecular components in kidney beans

芸豆品种	功能组分	实验对象	干预剂量	干预周期	生理功能
P.vulgaris	芸豆提取物	12 位青年志愿者(20~26 岁,BMI 19.7~23.5 kg/m^2)	100 mg,佐餐(碳水化合物供能 60%,脂肪供能 25%,蛋白质供能 15%)	一餐	降低餐后血糖[37]
白芸豆	芸豆提取物	四氧嘧啶糖尿病大鼠模型 (4 周龄 SD 雄性大鼠,25~30 g)	餐前控糖片(白芸豆 55%,马齿苋 35%, 质量分数), 低、中、高剂量(10、20、40 mg/kg)	2 周	降低餐后血糖[38]
白芸豆	芸豆提取物	无特定病原体的 SD 大鼠(3 周龄,60~80 g)	低、中、高剂量组(1、2、4 g/kg)	90 d	食用安全性[40]
P.vulgaris (K1152-P)	蛋白质	胆汁酸混合物:牛磺胆酸钠 35%、牛胆酸钠 35%、牛磺鹅去氧胆酸钠 15%、甘氨鹅脱氧胆酸钠 15%(质量分数)	口腔:α-淀粉酶 75 U/mL;胃液:胃蛋白酶 2 000 U/mL;肠液:胰酶 100 U/mL、胆汁酸 100 mg/mL 混合物	口腔:2 min;胃液:2 h;肠液:2 h	降脂[43]
	可溶性膳食纤维				
紫花芸豆	抗性淀粉	健康 Wistar 雄性大鼠	低、中、高剂量(1.35、2.7、5.4 g/kg)	6 周	修复肝脏、肠屏障损伤[44]
紫花芸豆	抗性淀粉	高脂血症大鼠模型 (无特定病原体 Wistar 雄性大鼠)	低、中、高剂量(1.35、2.7、5.4 g/kg)	6 周	缓解高脂血症致急性胰腺炎,修复肠屏障损伤[42]
P.vulgaris (ACUG 10-B2)	—	肥胖小鼠模型 (4 周龄,C57BL/6)	熟制芸豆粉质量分数 15.7%	12 周	肠益生,增强肠壁屏障功能[45]
白芸豆	蛋白质	肥胖小鼠模型 (3 周龄,C57BL/6)	芸豆蛋白质 17.5%、35%、70%(质量分数)	12~14 周	肠益生[46]
红芸豆	植物凝集素	黑色素瘤细胞 B16 和人肝癌细胞 QGY-7701	25、50、400、800、1 000、2 500 μg/mL	6、12、24、72 h	抑制肿瘤[48]
P.vulgaris L.	芸豆提取物	人乳腺癌细胞 MCF-7 和 MDA-MB231	25、50、100、200、300、400、500 μg/mL	24、48、72 h	抑制肿瘤[50]

加,粪便短链脂肪酸分泌水平随之显著提升,同时肠壁屏障功能增强,主要表现为紧密连接蛋白基因*ZO-1*、*Occludin*, 抗菌素基因*Reg3γ*、*IgA* 、*Defα5*、*Defβ2* 和黏液蛋白基因*Muc2* 表达上调。芸豆富含膳食纤维,属高发酵食物,其肠道益生功能也可能通过蛋白质来实现。Lutsiv 等表明膳食添加质量分数 35%的芸豆蛋白质可以显著延缓小鼠的肥胖症状,主要是增加了拟杆菌门, 降低变形菌门和厚壁菌门,菌群 α-多样性降低[46]。芸豆的发酵特性与其细胞壁完整度紧密相关,有研究发现红芸豆细胞在微生物发酵过程中可以保持完整性,但是采用磁力搅拌破碎子叶细胞后,微生物的产气量及产气速率均显著增加,细胞破碎处理同时促进了丙酸和丁酸的产生, 表明芸豆营养物质被微生物利用的效率增加,并且膳食纤维比淀粉和蛋白质更易被微生物发酵利用[47]。由此可见,食品体系的营养组分搭配及食品的分子结构与营养物质的释放和利用有很大关系,适当的加工尤为重要。

3.4 抑制肿瘤生长

肿瘤细胞表面具有大量的 PHA 受体,有利于靶向给药,抑制肿瘤的发生和发展。郑永发现云南地区产红芸豆凝集素 (red kidney bean lectin,RKBL)可以诱导黑色素瘤细胞 B16 和人肝癌细胞 QGY-7701 发生凋亡,抑制肿瘤细胞增殖,长达 18 个月的小鼠用药安全性实验表明长期注射 RKBL 不会致癌,也不会出现组织病理,具有长期用药安全性[48]。红芸豆抗黑色素瘤的功能组分主要存在于种皮中,Nie 等以小鼠 B16-F10 黑色素瘤细胞为模型, 鉴定出红芸豆种皮中槲皮素是抑制 B16-F10 细胞增殖的主要活性组分, 作用机制主要是通过调控 PI3K-AKT-FOXO 和 MDM2-p53 通路, 上调基因 *Bcl-xl* 表达,诱导细胞程序性死亡,从而抑制肿瘤细胞增殖[49]。然而,Kumar 等在对人乳腺癌细胞 MCF-7 和 MDA-MB231 的研究中, 发现芸豆提取物主要是通

过激活半胱天冬酶-3/7，上调 *Bax*、下调 *Bcl-xl* 和 *Bcl-2*基因表达诱发癌细胞凋亡[50]。由此可以推测，不同的芸豆品种和营养组分可能通过不同的信号通路抑制肿瘤细胞的增殖活性。

3.5 其他功能活性

芸豆 HPV 已被开发为一种具有避孕和抗 HIV 病毒的药物，郑永发现注射红芸豆植物凝集素的妊娠小鼠子宫内 STAT3 的表达量降低，推测红芸豆植物凝集素可能通过抑制 STAT3 的激活和表达，发挥终止妊娠的作用[48]。相比于几十年前就开始使用，目前仍作为外用避孕药的壬苯醇醚凝胶制剂，芸豆植物凝集素制成的凝胶可以有效保护雌兔阴道上皮细胞以及雄兔直肠上皮细胞的完整性，具有长期服用安全性。芸豆还有助于降低血小板高敏性相关的心血管血栓性疾病，主要是通过降低 5'-二磷酸腺苷和花生四烯酸诱导的血小板聚集[51]。

4 芸豆大分子组分的加工特性

4.1 芸豆蛋白质的加工特性

芸豆蛋白质的提取主要选用碱溶酸沉法，获得的蛋白质具有较高的热稳定性和凝胶特性，但是乳化特性较差，不利于其在食品工业中的应用。所以通常对芸豆蛋白质进行改性处理，以提升其加工特性，目前常用的芸豆蛋白质改性方法有物理、化学和生物酶法。李杨等使用绿原酸对黑芸豆分离蛋白进行改性，增强了其乳化特性和抗氧化活性，结构分析发现绿原酸主要改变了黑芸豆分离蛋白的二级结构，即 α-螺旋和无规则卷曲含量降低，而 β-转角含量增加[52]。不同的是，Tang 等采用葡萄糖对红芸豆球蛋白进行糖基化处理，使其 α-螺旋增加，形成了高度有序的二级结构和新的三级结构，构象的改变也提升了红芸豆球蛋白的乳化活性指数[53]。陈玲等发现低 pH(pH 为 2)、低离子强度(30 mmol/L)条件下，芸豆 7S 球蛋白溶液能够形成透明凝胶，其所需蛋白质远低于中性溶液[54]，降低了植物蛋白质凝胶制备时固形物的含量，此外，增加盐离子浓度还可以改善芸豆 7S 球蛋白的热稳定性[55]。物理和化学法结合优于单一化学法，李玉琼证明了超声波辅助糖基化比未辅助糖基化改性的红白花芸豆蛋白质具有更高的溶解性、乳化特性和起泡性，通过红外光谱和拉曼光谱发现，改性后芸豆蛋白质的 α-螺旋和 β-折叠结构增加，而 β-转角和无规则卷曲下降，说明糖基化改变了芸豆蛋白质二级结构主链，加大了和氨基糖的蛋白质接枝度，将超声辅助糖基化改性芸豆蛋白质添加于香肠体系，可以提升产品质构特性、感官接受度及得率[56]。

崔素萍等采用碱性蛋白酶及超滤法制备了英国红芸豆抗氧化肽，发现将其添加到大豆油中有一定的抗氧化作用，可以增加油脂的热稳定性，其抗氧化活性和相对分子质量大小呈负相关，相对分子质量小于 3 000 时，过氧化值、酸价和羰基价偏低，抗氧化活性强[57]。相似地，任海伟等使用碱性蛋白酶对泾川白芸豆进行水解，超滤分离纯化出抗氧化活性肽，发现相对分子质量小于 2 000 的小肽段具有较高的抗氧化活性[58]。蛋白酶种类对肽段的生物活性有一定影响，Roy 等使用胃蛋白酶和木瓜蛋白酶对深红芸豆蛋白质进行水解，结果显示，将芸豆分离蛋白应用于苹果汁储藏保鲜，可抑制大肠杆菌的活力且延缓氧化物质的形成，有作为新型食品抗氧化剂的潜质[59]。毛小雨等对紫花芸豆蛋白质进行体外消化模拟，发现随着酶解时间的延长和低相对分子质量肽段的增加，胃液酶解产物的总抗氧化活性和铁离子还原能力显著提升[60]。

4.2 芸豆多糖组分的加工特性及品质改良作用

淀粉的质构特性对于芸豆淀粉类食品的加工、感官品质等意义重大。Shevkani 等在对芸豆淀粉微观结构分析时发现，淀粉颗粒呈规则椭圆形，部分或者全部镶嵌于球形或不规则形状的蛋白质组分中，淀粉和蛋白质这种结构上的相互作用，有助于降低淀粉颗粒和淀粉酶的接触，降低淀粉的消化率[61]。Sharma 等用扫描电镜观察到芸豆淀粉颗粒凝聚成团，可能在提取淀粉时，蛋白质黏附在了淀粉颗粒上，发生了团聚现象，这可能解释了天然芸豆淀粉的稳定性和加工特性较差[62]。比如，新制备出的花芸豆淀粉凝胶具有较好的弹性，但是 24 h 后凝胶结构坍塌[63]。通过对芸豆淀粉改性处理可以显著改善其理化特性以提升加工品质，目前常见的淀粉改性方式有预热处理、湿热处理、干热处理、微生物发酵、挤压和高压灭菌等。湿热处理是常用的改性方法，可以在一定程度上降低芸豆淀粉的膨胀度、溶解度和黏度，提高糊化温度，促进淀粉分子定向重排，增加结构稳定性，同时促进蛋白质变性，使芸豆淀粉链结构及淀粉和蛋白质的相互作用发生改变，同时生成较多的抗性淀粉，继而增强抗消化特性。微生

物发酵处理，比如采用马克斯克鲁维酵母 KM 和植物乳杆菌 LI 协同发酵产生有机酸，尤其是乳酸，可以增强淀粉糊化过程中淀粉和蛋白质之间的相互作用，降低淀粉酶对淀粉的可消化性[29]。而预热处理可以增加直连淀粉含量，提高淀粉的可消化性。因此对于不同的加工用途需要选取不同的加工方式。

Khrisanapant 等采用湿热法处理芸豆和鹰嘴豆，发现芸豆淀粉的消化率随湿热处理时间的延长而增加，和鹰嘴豆相比，芸豆质地变化较慢，120 min 时硬度才降至最低值，可见处理时间的优化对产品的口感很重要[64]。也有研究者将预糊化和多菌发酵相结合，有助于提高豆类（扁豆、黑豆、鹰嘴豆和豌豆）酸面团抗性淀粉的含量，提高蛋白质的消化率，降低淀粉的消化率，增强其营养特性[65]。Siva 等对比了 7 种芸豆的多糖含量，发现熟制芸豆复热可增加抗性淀粉的含量，改变其营养品质[66]。Escobedo 等发现高压灭菌处理使芸豆制品中抗性淀粉质量分数降低 26.6%，而挤压法可以将质量分数降低 54.2%，同时膳食纤维的含量也会降低，但产品的持水力增加、溶解性降低，由此提出挤压处理后可用作布丁、酱类、奶油及乳制品等的增稠剂[67]。

5 芸豆及其大分子组分在食品加工中的应用

芸豆在主食类食品中的应用主要有将芸豆淀粉用于制作挂面，可以提升面条口感、弹性和韧性[68]。近年来，很多研究致力于将芸豆开发为具有一定营养功能尤其是减肥功效的烘焙食品、休闲食品。有研究者将经湿热处理的芸豆粉添加到面包中，可增加面包对 α-淀粉酶的抑制作用，降低淀粉消化率，制作面向糖尿病人群的低 GI 面包。Cappa 等将芸豆粉用于制作无麸质饼干，不仅增加了饼干中蛋白质含量，还增加了抗性淀粉含量，降低了淀粉消化率[69]。Shevkani 等将芸豆蛋白质用于制作无麸质松饼，使其面糊黏弹性提高，比容也有所增加[70]。贾琼对比了不同原料发酵而成的纳豆食品，发现以紫花芸豆、大豆为原料制作的纳豆，感官和营养指标均优于其他豆类，紫花芸豆发酵后 DPPH 自由基清除能力得到提升[71]。陈丽坤筛选出淀粉酶抑制特性最强的白芸豆品种，开发了具有抑制 α-淀粉酶特性的果冻类产品[72]。芸豆淀粉和蛋白质还被应用于食品保鲜，Zhang 等采用芸豆淀粉制成可食用生物涂膜，和市售玉米淀粉相比，涂膜水汽阻隔性和机械强度均显著增强[73]。芸豆淀粉-脂质形成的 V 型复合物还可以延缓淀粉颗粒凝胶化，限制颗粒溶胀、提高淀粉糊化温度、增加淀粉颗粒对酶水解的抗性[74]。

6 展 望

近年来，关于芸豆的功能性研究主要集中于抗性淀粉和 α-AI 的降脂减肥功效，由于芸豆单一营养成分功能特性具有局限性，因此可以和其他营养物质复配提高各营养组分的协同功效，从而开发出全营养型食品。由于前处理方式对芸豆不同营养物质的物化特性和溶出率影响较大，优化加工方式对特定营养物质的保留，以及对充分利用芸豆这一宝贵的植物资源具有重要的现实意义。目前市售芸豆产品大多以白芸豆为主，新型芸豆资源需要被开发。

近几年，在素食、环保主义者的推动下，植物基食品逐渐走入大众视野，已成为未来食品的一股潮流。植物基食品，包括植物肉、植物奶、植物蛋等，其核心思想即用植物来源的蛋白质代替动物源蛋白质。芸豆作为富含优质植物蛋白质的食用豆类资源之一，在此方面具有较高的开发潜力。不过，相比大豆蛋白，芸豆蛋白质的加工适应性、生物利用率和营养健康功能等方面仍需要进一步探索。同时，芸豆淀粉也是一种颇具特色的豆类淀粉，目前的研究开发还很不足，尤其是作为一种慢消化淀粉用于低 GI 食品的研发上，还需要结合芸豆品种和加工方式进一步深入研究。此外，在芸豆非淀粉多糖的研究上，目前国内外对于其组成、精细结构、结构与生理功能关系的研究还有待加强。总体而言，芸豆作为我国传统优势食用豆类资源，从其核心组分的营养、组成及功能等方面加强对芸豆的认识是很有必要的。为响应未来食品发展潮流，还需要加强对芸豆大分子组分的研究，以期为新型植物基、营养健康食品的开发提供更广泛、优良的物质基础。

参考文献：

[1] Food and Agriculture Organization. World food and agriculture：statistical yearbook[R]. Rome：FAO，2020.

[2] GARCÍA-CORDERO J, MARTÍNEZ-PALMA N, MADRIGAL-BUJAIDAR E, et al. Phaseolin, a protein from the seed of phaseolus vulgaris, has antioxidant, antigenotoxic, and chemopreventive properties[J]. **Nutrients**, 2021, 13(6): 1-16.
[3] SHI Z, ZHU Y, TENG C, et al. Anti-obesity effects of α-amylase inhibitor enriched-extract from white common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) associated with the modulation of gut microbiota composition in high-fat diet-induced obese rats[J]. **Food and Function**, 2020, 11(2): 1624-1634.
[4] 汪云吉. 花芸豆 α-淀粉酶抑制剂提取物的制备及提取残渣的利用[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
[5] CARRASCO-CASTILLA J, HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ A, JIMÉNEZ-MARTÍNEZ C, et al. Antioxidant and metal chelating activities of peptide fractions from phaseolin and bean protein hydrolysates[J]. **Food Chemistry**, 2012, 135(3): 1789-1795.
[6] 韩晶. 黑龙江芸豆主栽品种蛋白质营养价值分析及抗氧化活性肽的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
[7] 陈晓萌. 红芸豆清蛋白的提取及功能性研究[D]. 太原: 山西大学, 2015.
[8] 郭增旺, 陆涛, 瞿东杨, 等. 四种芸豆蛋白的理化与功能特性分析[J]. 中国食品添加剂, 2016, 8: 199-204.
[9] 訾艳, 王常青, 党彦飞, 等. 白芸豆球蛋白的提取及其氨基酸组成研究[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(8): 1267-1271.
[10] YIN S, TANG C, WEN Q, et al. Conformational and thermal properties of phaseolin, the major storage protein of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2011, 91(1): 94-99.
[11] MONTOYA C A, LALLÈS J P, BEEBE S, et al. Phaseolin diversity as a possible strategy to improve the nutritional value of common beans (*Phaseolus vulgaris*)[J]. **Food Research International**, 2010, 43(2): 443-449.
[12] OBIRO W C, ZHANG T, JIANG B. The nutraceutical role of the *Phaseolus vulgaris* α-amylase inhibitor[J]. **British Journal of Nutrition**, 2008, 100(1): 1-12.
[13] YANG M, ZHANG X, MA Y, et al. Purification and partial characterization of a glycoprotein alpha-amylase inhibitor from white kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. **Journal of Food Biochemistry**, 2008, 32(1): 72-84.
[14] 让一峰. 白芸豆 α- 淀粉酶抑制剂的制备及其在低 GI 方便粥中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
[15] 让一峰, 赵伟, 杨瑞金. 低胰蛋白酶抑制剂活力的白芸豆 α- 淀粉酶抑制剂的工业化制备方法探究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 1-5.
[16] 姜彩霞, 汪睿, 郑喜群, 等. 白芸豆中 α-淀粉酶抑制剂的制备及性质研究[J]. 食品科技, 2022, 47(2): 251-255.
[17] 迟永楠, 孙艳, 钟毓, 等. 白芸豆中 α-淀粉酶抑制剂的提取及其性能研究[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 225-230.
[18] LUCIUS K. Dietary lectins: gastrointestinal and immune effects[J]. **Alternative and Complementary Therapies**, 2020, 26(4): 168-174.
[19] REN J, SHI J, KAKUDA Y, et al. Comparison of the phytohaemagglutinin from red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) purified by different affinity chromatography[J]. **Food Chemistry**, 2008, 108(1): 394-401.
[20] 孙先保, 何述栋. 芸豆凝集素蛋白过敏原的检测及其脱敏食品加工工艺的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(12): 3746-3753.
[21] SUN X, HE X, YE Y, et al. Combined effects of pH and thermal treatments on IgE-binding capacity and conformational structures of lectin from black kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. **Food Chemistry**, 2020, 329: 1-10.
[22] 于雪慧, 童军茂, 张建. 奶花芸豆中凝集素的提取、纯化及鉴定[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 48-54.
[23] DONGRE P, SHAIKH N, GANGWAL P, et al. Isolation, partial purification and application of lectin isolated from *Phaseolus vulgaris* (red kidney bean)[J]. **International Journal of Research and Analytical Reviews**, 2019, 6(2): 685-692.
[24] KAN L, NIE S, HU J, et al. Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars[J]. **Food and Chemical Toxicology**, 2017, 108: 467-477.
[25] 吴会琴, 杨秋歌, 黄梦迪, 等. 白芸豆淀粉与小利马豆淀粉理化性质的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 33-38.
[26] 任顺成, 李翠翠, 李想, 等. 赤豆、刀豆、芸豆淀粉性质的比较[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 36-39.
[27] 王苗苗. 热加工对芸豆子叶细胞内含淀粉结构及体外消化性的影响机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
[28] 王婷. 芸豆预熟化工艺及理化性质研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2017.
[29] 程新. 湿热 - 多菌发酵对白芸豆面包营养及风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
[30] 张雅芝. 白芸豆中非淀粉多糖分离纯化、基本结构特征及其在面包中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.

[31] 张艳莉. 芸豆副产物膳食纤维发酵改性工艺及物化性质研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.
[32] DEALMEIDACOSTA G E,QUEIROZ-MONICI K S,MACHADOREIS S M P,et al. Chemical composition,dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea,common bean,chickpea and lentil legumes[J]. **Food Chemistry**,2006,94(3):327-330.
[33] YI J,NJOROGE D M,SILA D N,et al. Detailed analysis of seed coat and cotyledon reveals molecular understanding of the hard-to-cook defect of common beans(*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. **Food Chemistry**,2016,210:481-490.
[34] 李安琪. 高压微射流处理对芸豆多糖结构特征及其抑制消化酶活性能力的影响[D]. 南昌:南昌大学,2020.
[35] TANG W,LI A,YIN J,et al. Structural characteristics of three pectins isolated from white kidney bean[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2021,182:2151-2161.
[36] World Health Organization. Obesity and overweight[EB/OL].(2021-06-09)[2022-11-30]. https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight.
[37] SPADAFRANCA A,RINELLI S,RIVA A,et al. Phaseolus vulgaris extract affects glycometabolic and appetite control in healthy human subjects[J]. **British Journal of Nutrition**,2013,109(10):1789-1795.
[38] 张雪苍,薛红梅. 白芸豆-马齿苋餐前控糖片的工艺研究及控糖效果评价[J]. 食品科技,2020,45(7):38-43.
[39] PEDDIO S,PADIGLIA A,CANNEA F B,et al. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) α-amylase inhibitors as safe nutraceutical strategy against diabetes and obesity:an update review[J]. **Phytotherapy Research**,2022,36(7):2803-2823.
[40] QIN G,WANG F,LIANG H,et al. Subchronic study of a white kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) extract with α-amylase inhibitory activity[J]. **BioMed Research International**,2019,2019:1-9.
[41] MOHAMED S A,ELSHAL M F,KUMOSANI T A,et al. *L*-Asparaginase isolated from *Phaseolus vulgaris* seeds exhibited potent anti-acute lymphoblastic leukemia effects *in-vitro* and low immunogenic properties *in-vivo*[J]. **International Journal of Environmental Research and Public Health**,2016,13(10):1008-1025.
[42] ZUO Z,LIU S,PANG W,et al. Beneficial effect of kidney bean resistant starch on hyperlipidemia-induced acute pancreatitis and related intestinal barrier damage in rats[J]. **Molecules**,2022,27(9):1-14.
[43] LIN T,O'KEEF S,DUNCAN S,et al. Retention of primary bile salts by dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during *in vitro* digestion:role of bean components and effect of food processing[J]. **Food Research International**,2020,137:1-14.
[44] 刘淑婷,王颖,王志辉,等. 超声-微波协同酶法制备芸豆抗性淀粉工艺优化及结构分析[J]. 中国食品学报,2020,20(5):187-195.
[45] MONK J M,WU W,LEPP D,et al. Navy bean supplementation in established high-fat diet-induced obesity attenuates the severity of the obese inflammatory phenotype[J]. **Nutrients**,2021,13(3):1-20.
[46] LUTSIV T,MCGINLEY J N,NEIL-MCDONALD E S,et al. Compositional changes of the high-fat diet-induced gut microbiota upon consumption of common pulses[J]. **Nutrients**,2021,13(11):1-20.
[47] ROVALINO-CÓRDOVA A M,FOGLIANO V,CAPUANO E. *In vitro* colonic fermentation of red kidney beans depends on cotyledon cells integrity and microbiota adaptation[J]. **Food and Function**,2021,12(11):4983-4994.
[48] 郑永. 红芸豆凝集素的一些药效学基础及致癌性试验研究[D]. 昆明:云南师范大学,2018.
[49] NIE J,QIN X,LI Z. Revealing the anti-melanoma mechanism of n-BuOH fraction from the red kidney bean coat extract based on network pharmacology and transcriptomic approach[J]. **Food Research International**,2021,140:1-12.
[50] KUMAR S,SHARMA V K,YADAV S,et al. Antiproliferative and apoptotic effects of black turtle bean extracts on human breast cancer cell line through extrinsic and intrinsic pathway[J]. **Chemistry Central Journal**,2017,11(1):1-10.
[51] RODRÍGUEZ-AZUA R,QUINTEROS E F,OLATE-BRIONES A,et al. Phaseolus vulgaris exerts an inhibitory effect on platelet aggregation through AKT dependent way[J]. **Preventive Nutrition and Food Science**,2018,23(2):102-107.
[52] 李杨,闫世长,齐宝坤,等. 绿原酸改性黑芸豆蛋白抗氧化活性与乳化性能研究[J]. 农业机械学报,2020,51(5):356-362.
[53] TANG C,SUN X,FOEGEDING E A. Modulation of physicochemical and conformational properties of kidney bean vicilin (Phaseolin) by glycation with glucose:implications for structure-function relationships of legume vicilins [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2011,59(18):10114-10123.

[54] 陈玲,唐传核. 热致芸豆 7S 球蛋白透明凝胶性能研究[J]. 现代食品科技,2010,26(5):433-436.
[55] 孙鑫,唐传核,尹寿伟. 芸豆 7S 球蛋白的热性质研究[J]. 现代食品科技,2008(8):777-780.
[56] 李玉琼.超声辅助芸豆蛋白糖基化改性及其在香肠中的应用[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2016.
[57] 崔素萍,穆秋霞,曲柳青,等. 芸豆蛋白抗氧化肽组分对大豆油热氧化稳定性的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(1):56-61.
[58] 任海伟,李志忠,王鸣刚,等. 超滤对芸豆蛋白酶解物抗氧化活性的影响[J]. 食品科学,2009,30(18):212-216.
[59] ROY M,SARKER A,AZAD M A K,et al. Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of dark red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) protein hydrolysates[J]. **Journal of Food Measurement and Characterization**,2020,14(1):303-313.
[60] 毛小雨,许馨予,杨鹄隽,等. 紫花芸豆蛋白体外消化产物的抗氧化活性及结构特征分析[J]. 食品科学,2021,42(3):56-62.
[61] SHEVKANI K,KAUR R,SINGH N,et al. Colour,composition,digestibility,functionality and pasting properties of diverse kidney beans(*Phaseolus vulgaris*) flours[J]. **Current Research in Food Science**,2022,5:619-628.
[62] SHARMA S,SINGH N,VIRDI A S,et al,Himalayan kidney bean germplasm:grain-flour characteristics,structural-functional properties and *in-vitro* digestibility of starches[J]. **Food Research International**,2015,77:498-505.
[63] 黄智慧,黄立新,吕童. 花芸豆淀粉的性质研究[J]. 食品与发酵工业,2006,32(8):35-40.
[64] KHRISANAPANT P,LEONG S Y,KEBEDE B,et al. Effects of hydrothermal processing duration on the texture,starch and protein *in vitro* digestibility of cowpeas,chickpeas and kidney beans[J]. **Foods**,2021,10(6):1-22.
[65] DEPASQUALE I,PONTONIO E,GOBBETTI M,et al. Nutritional and functional effects of the lactic acid bacteria fermentation on gelatinized legume flours[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2020,316:1-12.
[66] SIVA N,THAVARAJAH P,THAVARAJAH D. Prebiotic carbohydrate concentrations of common bean and chickpea change during cooking,cooling,and reheating[J]. **Journal of Food Science**,2020,85(4):980-988.
[67] ESCOBEDO A,LOARCA-PINA G,GAYTAN-MARTINEZ M,et al. Autoclaving and extrusion improve the functional properties and chemical composition of black bean carbohydrate extracts[J]. **Journal of Food Science**,2020,85(9):2783-2791.
[68] 周睿,曹龙奎,张桂芳,等. 芸豆营养挂面的研制及品质特性的研究[J]. 农产品加工(学刊),2014(21):1-4.
[69] CAPPA C,KELLY J D,NG P K W. Baking performance of 25 edible dry bean powders:correlation between cookie quality and rapid test indices[J]. **Food Chemistry**,2020,302:1-11.
[70] SHEVKANI K,SINGH N. Influence of kidney bean,field pea and amaranth protein isolates on the characteristics of starch-based gluten-free muffins[J]. **International Journal of Food Science and Technology**,2014,49(10):2237-2244.
[71] 贾琼. 纳豆菌对紫花芸豆的发酵条件优化及理化特性研究[D]. 大连:大连工业大学,2016.
[72] 陈丽坤. 不同品种白芸豆中 α-AI 的比较及其果冻类产品的研发[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
[73] ZHANG Y,LI Y. Comparison of physicochemical and mechanical properties of edible films made from navy bean and corn starches[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2021,101(4):1538-1545.
[74] SHEVKANI K,KAUR R,SINGH N,et al. Colour,composition,digestibility,functionality and pasting properties of diverse kidney beans(*Phaseolus vulgaris*) flours[J]. **Current Research in Food Science**,2022,5:619-628.